



# Méthodologies d'identification d'économies d'énergie : application aux systèmes de climatisation à eau glacée

Julien Caillet

## ► To cite this version:

Julien Caillet. Méthodologies d'identification d'économies d'énergie : application aux systèmes de climatisation à eau glacée. Autre. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2010. Français. NNT : 2010ENMP0049 . pastel-00566261

**HAL Id: pastel-00566261**

**<https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00566261>**

Submitted on 15 Feb 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

École doctorale n° 432-SMI : Sciences des Métiers de l'Ingénieur

**Doctorat ParisTech**

**T H È S E**

pour obtenir le grade de docteur délivré par

**l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris**

**Spécialité “ Energétique ”**

*présentée et soutenue publiquement par*

**Julien CAILLET**

le 7 Décembre 2010

**Méthodologies d'identification d'économies d'énergie :  
Application aux systèmes de climatisation à eau glacée**

Directeur de thèse : **Jérôme ADNOT**  
Co-encadrement de la thèse : **Philippe Rivière**

**Jury**

**M. Bernard LACHAL**, Professeur, Université de Genève  
**M. Marco MASOERO**, Professeur, Politecnico di Torino  
**M. Jérôme ADNOT**, Professeur, CEP, Mines ParisTech  
**M. Bertrand GUILLEMOT**, Responsable du Département Expertise Techniques, Dalkia France  
**M. Dominique MARCHIO**, Professeur, CEP, Mines ParisTech  
**M. Philippe RIVIERE**, Docteur, CEP, Mines ParisTech

Rapporteur  
Rapporteur  
Examineur  
Examineur  
Examineur  
Examineur

**T  
H  
È  
S  
E**









*« Si vous avez besoin de quelque chose, appelez-moi.  
Je vous dirai comment vous en passer. »*

Coluche



# Remerciements

Ce travail de recherche a été réalisé au sein de l'équipe Maîtrise de la Demande en Energie du Centre Energétique et Procédés de l'Ecole des Mines de Paris.

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de thèse Jérôme Adnot pour m'avoir laissé évoluer sur ce sujet de thèse mêlant contraintes politique et technique. Je remercie le binôme d'encadrement, compléter par mon maître de thèse Philippe Rivière, pour les conseils avisés et le soutien pendant les moments clefs de ce travail.

Je remercie les examinateurs et les rapporteurs de ce travail – Marco Masoero de Politecnico di Torino, Bernard Lachal de l'université de Genève, Bertrand Guillemot de la société Dalkia – pour avoir accepté de participer à l'évaluation de ce sujet de thèse.

Je remercie Dominique Marchio pour avoir présidé le jury et pour avoir contribuer aux échanges au sein du CEP Paris.

Je tiens par ailleurs à saluer les collaborateurs français et européens du projet HarmonAC qui ont contribué à m'enrichir techniquement et culturellement – Christina, Stéphane, Jacopo, Margarita, André et Dave.

Je suis aussi reconnaissant du soutien administratif et informatique proposé par Philomène Angelosanto, Anne-Marie Pougin, Aline Garnier, et Philippe Calvet. Ils m'ont permis d'effectuer cette thèse dans de très bonnes conditions.

Je salue plus particulièrement Michèle Dupuy pour sa bonne humeur, son sourire et surtout pour ses fameuses pâtisseries.

J'adresse un grand merci à tous les membres de l'équipe qui ont fortement contribué à la bonne ambiance du centre, Marcello pour son expansivité, Anna pour son humour « tchica tchica », bien sûr les plus anciens Bruno, Pascal, Anthony, Laurent, Elias et bien entendu les plus « nouveaux » comme Ozlem, Cyril, Olivier et Charles. Je tiens à saluer sincèrement David pour sa fameuse « danse de bureau », mais également pour son intrépidité à me suivre sur les sommets givrés des Alpes.

Mes remerciements vont également à mes parents, ma famille et mes amis, qui de près ou de loin ont supporté les meilleurs comme les moins bons moments de ce travail.

Mes derniers remerciements vont à Céline pour m'avoir supporté pendant les périodes les plus difficiles de ce travail.



# Table des matières

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>17</b>
<b>CHAPITRE 1 DE LA CONCEPTION A L'EXPLOITATION DES SYSTEMES DE CLIMATISATION A EAU GLACEE .....</b>	<b>25</b>
1.1 RECONNAISSANCE D'UN SYSTEME : TYPOLOGIE D'UN SYSTEME .....	26
1.2 COMMENT EXPLOITER UN SYSTEME : LA REGULATION ET LES TECHNIQUES D'EXPLOITATION .....	29
1.3 COMPRENDRE LA REGULATION ET L'ARCHITECTURE CENTRALE DE LA DISTRIBUTION D'EAU .....	31
1.4 COMPRENDRE L'ARCHITECTURE LOCALE D'UN RESEAU DE DISTRIBUTION D'EAU.....	34
1.5 COMPRENDRE LA REGULATION DE L'EMISSION.....	36
1.6 ANALYSER UN RESEAU DE DISTRIBUTION D'EAU DANS UN BATIMENT .....	38
1.7 COMPRENDRE L'INSTALLATION DU RESEAU DE DISTRIBUTION .....	41
1.8 EXPLOITER LES RESEAUX DE DISTRIBUTION D'EAU GLACEE.....	43
1.9 DE LA CHARGE THERMIQUE AU DIMENSIONNEMENT DES EQUIPEMENTS .....	48
1.10 LA MAINTENANCE D'UNE INSTALLATION .....	57
1.11 LE CONFORT THERMIQUE DES OCCUPANTS.....	58
1.12 SYNTHESE DE LA BIBLIOGRAPHIE .....	60
<b>CHAPITRE 2 ETABLISSEMENT D'UN REFERENTIEL D'OPPORTUNITES ENERGETIQUES.....</b>	<b>61</b>
2.1 METHODE POUR ETABLIR UN REFERENTIEL D'OPPORTUNITES ENERGETIQUES .....	63
2.2 ANALYSE D'UNE LISTE D'OPPORTUNITES .....	67
2.3 L'EFFICACITE DE LA DISTRIBUTION, UNE OPPORTUNITE D'ECONOMIE D'ENERGIE ? .....	69
2.4 L'EFFICACITE DE LA PRODUCTION, UNE OPPORTUNITE D'ECONOMIE D'ENERGIE ? .....	75
2.5 L'EFFICACITE DE L'EMISSION, UNE OPPORTUNITE D'ECONOMIE D'ENERGIE ?.....	78
2.6 LA MAITRISE DU BESOIN THERMIQUE DU BATIMENT.....	80
2.7 SYNTHESE DES OPPORTUNITES ENERGETIQUES .....	81
<b>CHAPITRE 3 COMMENT IDENTIFIER DES OPPORTUNITES ENERGETIQUES ? .....</b>	<b>83</b>
3.1 METHODOLOGIE DE BENCHMARKING .....	85
3.2 METHODES DE DETECTION DE DEFAUTS UTILISEES DANS LA MAINTENANCE .....	89
3.3 L'INSPECTION NORMATIVE DES INSTALLATIONS.....	95
3.4 FORMALISATION DE REFERENTIELS POUR L'IDENTIFICATION .....	97
3.5 SYNTHESE DES DIFFERENTES METHODOLOGIES D'IDENTIFICATION.....	100
<b>CHAPITRE 4 METHODES ET PROCEDURES D'EVALUATION DES ECONOMIES D'ENERGIE .....</b>	<b>101</b>
4.1 METHODES D'EVALUATION DES ECONOMIES D'ENERGIE .....	102
4.2 LES SERVICES ENERGETIQUES, UNE EVALUATION GARANTIE DE L'ECONOMIE D'ENERGIE ? .....	106
4.3 STRUCTURE ET CONTENU D'UNE PROCEDURE D'IDENTIFICATION D'ECONOMIE D'ENERGIE .....	110
4.4 SYNTHESE DES METHODES D'EVALUATION DES ECONOMIES D'ENERGIE .....	114
<b>CHAPITRE 5 SELECTION D'OUTILS DE MODELISATION POUR L'EVALUATION DES ECONOMIES D'ENERGIE .....</b>	<b>115</b>
5.1 TECHNIQUES DE MODELISATION POUR UNE EVALUATION DYNAMIQUE .....	116
5.2 MODELISATION DE L'ENVELOPPE .....	117
5.3 SELECTION D'UN OUTIL DE MODELISATION DYNAMIQUE.....	120
5.4 MODELISATION DU CONTROLE DES EQUIPEMENTS .....	121
5.5 MODELISATION D'UN MOTEUR POUR EVALUER DES ECONOMIES D'ENERGIE .....	126
5.6 MODELISATION DE LA DISTRIBUTION D'EAU / D'AIR POUR EVALUER DES ECONOMIES D'ENERGIE .....	129
5.7 MODELISATION D'UNE BATTERIE FROIDE.....	134
5.8 SYNTHESE DE LA SELECTION DE MODELES ET TECHNIQUES DE MODELISATION .....	138
<b>CHAPITRE 6 APPLICATION DES METHODES POUR L'EXPLOITATION DU RESEAU D'EAU GLACEE.....</b>	<b>139</b>
6.1 ANALYSE TECHNIQUE DES SOLUTIONS.....	141
6.2 PROCEDURE D'IDENTIFICATION DES OPPORTUNITES .....	144
6.3 RECHERCHE DE METHODES D'EVALUATION DES ECONOMIES D'ENERGIE.....	145
6.4 MISE AU POINT D'UNE BASE DE DONNEE D'EQUIPEMENTS ET DE BATIMENTS .....	146
6.5 METHODE D'EVALUATION DES ECONOMIES D'ENERGIE POUR LE CONTROLE D'UN SYSTEME 4 TUBES	152

6.6	METHODES D'EVALUATION DES ECONOMIES D'ENERGIE POUR L'EXPLOITATION DU DEBIT VARIABLE	156
6.7	METHODES D'EVALUATION DE LA CONSOMMATION PRE-MODERNISATION	171
6.8	PROCEDURE D'IDENTIFICATION D'ECONOMIE D'ENERGIE POUR L'EXPLOITATION DU DEBIT VARIABLE	176
6.9	PROCEDURES D'IDENTIFICATION D'ECONOMIE D'ENERGIE POUR L'EXPLOITATION CENTRALE	180
<b>CHAPITRE 7 APPLICATION DE STRATEGIES D'EXPLOITATION POUR ECONOMISER L'ENERGIE ET MAITRISER LE CONFORT DE L'OCCUPANT</b>		<b>181</b>
7.1	INTERACTION ENTRE LE CONFORT ET L'EXPLOITATION D'UN SYSTEME DE CLIMATISATION	182
7.2	EVALUATION DE L'AMELIORATION DU CONFORT POUR LE CONTROLE D'UN SYSTEME DEUX TUBES	186
7.3	EVALUATION DES ECONOMIES D'ENERGIE POUR UNE EXPLOITATION HYBRIDE DE LA TEMPERATURE	189
7.4	SYNTHESE DES PROPOSITIONS	192
<b>CHAPITRE 8 PROPOSITION DE BENCHMARKS PARAMETRES POUR UNE INSPECTION REGLEMENTAIRE</b>		<b>193</b>
8.1	CRITIQUE DE L'APPROCHE REGLEMENTAIRE EXISTANTE DE LA PROCEDURE D'INSPECTION	195
8.2	VERS UNE EVALUATION QUANTITATIVE DE L'EFFICACITE ET DES CONCLUSIONS DE QUALITE	198
8.3	EVALUATION DE L'EFFICACITE D'UN GROUPE FRIGORIFIQUE	202
8.4	EVALUATION DE LA CONSOMMATION DES EQUIPEMENTS EN FONCTION DE LEURS SPECIFICITES DE CONCEPTION	208
8.5	EVALUATION QUANTITATIVE DE L'EFFICACITE DE L'EXPLOITATION	217
8.6	DEVELOPPEMENT D'UNE PROCEDURE D'EVALUATION DU SSEER D'UNE INSTALLATION EXISTANTE	227
8.7	UTILISATION D'UNE LISTE D'OPPORTUNITES ENERGETIQUES POUR LE DEVELOPPEMENT D'UNE PROCEDURE D'INSPECTION	230
8.8	SYNTHESE DE LA PROCEDURE D'INSPECTION REGLEMENTAIRE PROPOSEE	243
<b>CONCLUSIONS</b>		<b>244</b>
<b>REFERENCES</b>		<b>246</b>
<b>ANNEXE 1 LISTE DES OPPORTUNITES ENERGETIQUES</b>		<b>252</b>
<b>ANNEXE 2 EXEMPLES DE FICHES SYNTHETIQUES D'OPPORTUNITES ENERGETIQUES</b>		<b>256</b>
<b>ANNEXE 3 EXEMPLES D'ESTIMATIONS DE L'ECONOMIE D'ENERGIE POUR UNE EXPLOITATION A DEBIT VARIABLE</b>		<b>312</b>
<b>ANNEXE 4 EXEMPLE D'APPLICATION DES PROCEDURES DEVELOPPEES</b>		<b>315</b>
<b>ANNEXE 5 PROCEDURE DE MESURE DE LA PUISSANCE ELECTRIQUE POUR UN RESEAU DESEQUILIBRE</b>		<b>318</b>
<b>ANNEXE 6 DETERMINATION DU ESEER D'UN GPEG A DEFAUT D'INFORMATION</b>		<b>320</b>
<b>ANNEXE 7 STATISTIQUES DES CERTIFICATS D'ECONOMIES D'ENERGIE (CEE)</b>		<b>322</b>

# Liste des tableaux

Tableau 1-1 Exemple extrait d'un catalogue constructeur .....	52
Tableau 1-2 Puissance frigorifique tabulée d'un groupe de production d'eau glacée [CIAT3] .....	52
Tableau 1-3 Tableau de données constructeur GPEG [Carrier] .....	53
Tableau 1-4 Description des niveaux de confort types selon [EN15251].....	58
Tableau 1-5 Limites de confort pour un bâtiment climatisé [EN15251].....	59
Tableau 2-1 Catégories et sous-catégories d'opportunités énergétiques.....	68
Tableau 3-1 Benchmark de la charge thermique en fonction du secteur d'activité [BSRI03] .....	86
Tableau 3-2 Benchmark de la puissance installée par type d'installation et d'activité [Dupont06] .....	86
Tableau 3-3 Classification de différents benchmarks issus de la littérature .....	88
Tableau 3-4 Alarmes intégrées dans un GPEG [CARRIER09].....	90
Tableau 3-5 Tendance d'évolution de la puissance électrique pour le diagnostic [Com02] .....	91
Tableau 3-6 Exemple de points de contrôle d'une machine frigorifique .....	95
Tableau 4-1 Sélection d'une méthode d'évaluation en fonction de la méthode d'ajustement et de la phase du projet .....	103
Tableau 4-2 Comparaison des méthodes d'évaluation .....	105
Tableau 4-3 Caractéristiques d'un projet et de l'utilisation des options de [IPMVP07], adapté de [Duplessis08].....	109
Tableau 4-4 Sélection d'une méthode d'évaluation .....	113
Tableau 5-1 Sélection d'un outil de simulation.....	120
Tableau 5-2 Coefficients utilisés pour le facteur de correction à charge partielle.....	127
Tableau 6-1 Profil de charge d'une pompe selon [EUP08] pour le parc résidentiel allemand.....	145
Tableau 6-2 Répartition et caractéristiques géométriques de bâtiments typiques [IEA48].....	147
Tableau 6-3 Caractéristiques géométriques par zone d'occupation [IEA48] .....	147
Tableau 6-4 Répartition de 30 villes Européennes dans cinq zone climatiques basées sur le flux solaire global, les degrés heures de climatisation et de chauffage [KeepCool10].....	148
Tableau 6-5 Matrice système/bâtiment [IEA48] .....	149
Tableau 6-6 Différentiel de pression nominal de la pompe en fonction de la typologie du bâtiment [IEA48] .....	150
Tableau 6-7 Période de chauffage et de climatisation .....	152
Tableau 6-8 Impact du climat réel sur les économies d'énergie .....	153
Tableau 6-9 Inconfort généré pour une date préprogrammée .....	154
Tableau 6-10 Paramètres de l'étude .....	158
Tableau 6-11 type 1C climat de paris, extrait de [Caillet10].....	161
Tableau 6-12 $E\%$ pour la stratégie différentiel de pression constant.....	162
Tableau 6-13 $E\%$ pour la stratégie différentiel de pression proportionnel.....	162
Tableau 6-14 $E\%$ pour la stratégie basée sur la demande .....	162
Tableau 6-15 $E\%$ pour la stratégie différentiel de pression constant.....	162
Tableau 6-16 $E\%$ pour la stratégie différentiel de pression proportionnel.....	163
Tableau 6-17 $E\%$ pour la stratégie basée sur la demande .....	163
Tableau 6-18 Correspondance des catégories de puissance du moteur / typologie des bâtiments .....	164
Tableau 6-19 Effet de la dynamique de la régulation sur $E\%$ pour la stratégie différentiel de pression constant.....	165
Tableau 6-20 Effet de la dynamique de la régulation sur $E\%$ pour la stratégie différentiel de pression proportionnel.....	165
Tableau 6-21 Effet de la dynamique de la régulation sur $E\%$ pour la stratégie basée sur la demande ..	165
Tableau 6-22 Effet de l'occupant sur $E\%$ pour la stratégie différentiel de pression constant .....	166
Tableau 6-23 Effet de l'occupant sur $E\%$ pour la stratégie différentiel de pression proportionnel.....	166
Tableau 6-24 Effet de l'occupant sur $E\%$ pour la stratégie basée sur la demande .....	166
Tableau 6-25 Facteurs sensibles retenus .....	167
Tableau 6-26 Synthèse de l'indicateur $E\%$ VSD pour des ventilo-convecteurs à une vitesse d'air .....	168
Tableau 6-27 Synthèse de l'indicateur $E\%$ VSD pour des ventilo-convecteurs à 3 vitesses avec régulation automatique .....	168
Tableau 6-28 Valeurs de la perte de charge de l'évaporateur .....	173
Tableau 6-29 Perte de charge du réseau secondaire .....	174
Tableau 6-30 Calcul de la charge thermique maximale .....	175
Tableau 6-31 Puissance électrique du moteur pour la typologie de [IEA48] .....	175
Tableau 6-32 Limites de coût du plan M&V pour notre action .....	177
Tableau 7-1 Inconfort pour le cas de référence et un système 2 tubes .....	187



Tableau 7-2 Comparaison d'une stratégie classique et d'une stratégie optimisée .....	187
Tableau 7-3 Impact des facteurs de différenciation sur les indicateurs de confort.....	187
Tableau 8-1 Exemple de points de contrôle d'une machine frigorifique .....	196
Tableau 8-2 Nomenclature des postes.....	200
Tableau 8-3 Coefficients de pondération et températures d'essais correspondant à différents systèmes et climats [EECCAC03].....	205
Tableau 8-4 Tendance d'évolution de la puissance pour le diagnostic [Com02].....	206
Tableau 8-5 Consommations des postes pour un GPEG refroidi à l'air, une CTA et des ventilo-convecteurs pour Séville et Londres, adapté de [EECCAC03] .....	208
Tableau 8-6 Benchmark du besoin thermique de bâtiments représentatifs du parc [Keepcool10] .....	209
Tableau 8-7 Consommations des auxiliaires (réseau hydraulique et aéraulique), adapté de [EECCAC03] .....	209
Tableau 8-8 Exemple de temps de fonctionnement à charge thermique non nulle.....	210
Tableau 8-9 Pertes de charge caractéristiques des éléments d'une centrale de traitement de l'air extrait de [EN13779] .....	212
Tableau 8-10 Valeurs normatives de la demande d'énergie des ventilateurs, extrait de [EN15243] .....	214
Tableau 8-11 Puissance spécifique du système de ventilation utilisé pour le refroidissement du groupe frigorifique, extrait de [EN15243] .....	215
Tableau 8-12 Passage d'un ventilateur radial à un ventilateur axial .....	215
Tableau 8-13 Facteurs globaux d'efficacité d'une GTB pour les bureaux d'après [EN15232] .....	218
Tableau 8-14 Typologie des fonctions d'une GTB et fonctions minimales d'une classe C d'après [EN15232] .....	220
Tableau 8-15 Données de référence, d'après [EECCAC03].....	225
Tableau 8-16 Hypothèses et résultats d'application de la procédure de correction .....	225
Tableau 8-17 Classification fréquentielle d'améliorations [Harmonac08] .....	231
Tableau 8-18 Méthode de mesurage extrait de [Dupont06].....	234
Tableau 8-19 Indicateurs à examiner, extrait de [Dupont06] .....	234
Tableau 8-20 Benchmark des indicateurs, extrait de [Dupont06] .....	234
Tableau 8-21 Coefficients correcteurs pour la maintenance du GPEG .....	235
Tableau 8-22 Impact du surdimensionnement sur le SEER, pour un système à débit d'air constant, climat de Londres, extrait de [Riviere04].....	238
Tableau 8-23 Impact du surdimensionnement sur le SEER, pour un système à débit d'air constant, climat de Lisbonne, extrait de [Riviere04] .....	238
Tableau 8-24 Gain thermique du système de ventilation sur le réseau aéraulique .....	239
Tableau 8-25 Gain thermique de la pompe sur le réseau d'eau glacée .....	240

# Liste des figures

Figure 1-1 CTA multi-zones avec traitement terminal.....	27
Figure 1-2 Système avec CTA primaire et secondaire (voir note en bas de la page 27) .....	28
Figure 1-3 Système à débit variable (voir note en bas de la page 27).....	28
Figure 1-4 Loi d'eau et d'air pour un système deux tubes sans inversion .....	31
Figure 1-5 Schéma de principe d'un système à inversion à mélange.....	32
Figure 1-6 Schéma de principe d'un système à deux tubes à inversion avec échangeur .....	32
Figure 1-7 Exemple de loi d'air et d'eau pour un système 2 tubes à inversion .....	33
Figure 1-8 Exemple de loi d'air et d'eau pour un système 4 tubes .....	33
Figure 1-9 Montage vanne 3 voies .....	34
Figure 1-10 Montage vanne 2 voies par régulation d'une vanne 2 voies.....	35
Figure 1-11 Montage vanne 2 voies par pompe à vitesse variable.....	35
Figure 1-12 Ouverture des vannes d'eau chaude et d'eau froide par « bande morte » .....	36
Figure 1-13 Changement de consigne pour un système deux tubes, extrait de [Cyssau95].....	36
Figure 1-14 Technologie de contrôle local d'un système 4 tubes, extrait de [Cyssau95] .....	37
Figure 1-15 Architecture à débit constant.....	38
Figure 1-16 Architecture à débit variable au secondaire.....	38
Figure 1-17 Architecture à débit variable au secondaire avec pompes dédiées.....	39
Figure 1-18 Architecture à proscrire .....	39
Figure 1-19 Architecture à débit variable au primaire .....	39
Figure 1-20 Architecture à débit variable au primaire et au secondaire.....	40
Figure 1-21 Régulation de l'émission par une vanne 3 voies.....	42
Figure 1-22 Régulation de vitesse à pression différentielle constante .....	43
Figure 1-23 Régulation à pression différentielle proportionnelle au débit.....	44
Figure 1-24 Régulation selon les besoins .....	44
Figure 1-25 Représentation schématique pour la mise en marche de la climatisation selon [NORMJAP06] .....	47
Figure 1-26 Exemple schématique de CTA, extrait de [Wesper10] .....	49
Figure 1-27 Abaques de sélection d'un échangeur, extrait de [Airwell] .....	50
Figure 1-28 Abaque des pertes de charge de l'évaporateur, extrait de [Airwell] .....	50
Figure 1-29 Exemple de données techniques simplifiées, extrait de [CIAT2].....	51
Figure 1-30 Exemple de recommandation constructeur pour l'utilisation d'un débit variable [Carrier] .....	53
Figure 1-31 Règle des 3D, dimensionnement d'une bouteille de découplage.....	56
Figure 1-32 Schéma des valeurs de température acceptable pour un bâtiment non climatisé [EN15251].....	58
Figure 2-1 Cycle de vie simplifié d'un ensemble {bâtiment, système} .....	61
Figure 2-2 Recherche des postes d'amélioration.....	64
Figure 2-3 Recherche d'opportunité par analyse du cycle de vie d'un équipement .....	66
Figure 2-4 Variation de puissance pour une batterie chaude de CTA [ASHRAEA07].....	69
Figure 2-5 Variation de puissance d'une batterie froide en fonction du débit, d'après [ASHRAEA07] .....	70
Figure 2-6 Economie de puissance pour une stratégie à différentiel de pression constant.....	71
Figure 2-7 Economie de puissance pour une stratégie à différentiel de pression proportionnel .....	71
Figure 2-8 Economie de puissance pour une stratégie basée sur la demande .....	72
Figure 2-9 Efficacité relative de groupe frigorifique, extrait de [Riviere04].....	75
Figure 3-1 Développement des méthodologies d'identification.....	83
Figure 3-2 Instanciation des procédures sur un bâtiment spécifique .....	83
Figure 3-3 Extrait de [Kalz10] .....	87
Figure 3-4 Représentation causale d'un encrassement du condenseur côté air et des paramètres d'observation [Bory08] .....	91
Figure 3-5 Méthodologie générale de simulation de défauts [Bory08].....	92
Figure 3-6 Procédure complète d'identification de l'ECO O3.17 .....	93
Figure 3-7 Procédure d'identification simplifiée de l'ECO O3.17 .....	94
Figure 4-1 Méthodologies d'identification d'opportunités et d'évaluation d'économie .....	101
Figure 4-2 Consommation mesurée et calculée.....	103
Figure 4-3 Les services énergétiques un exemple de procédure d'identification .....	106
Figure 4-4 L'analyse des informations.....	106
Figure 4-5 Les étapes de mise en place d'un service énergétique .....	107
Figure 4-6 Structure de la procédure d'identification d'économie d'énergie .....	110
Figure 5-1 La complexité du modèle versus l'incertitude des paramètres [Trčka10].....	116
Figure 5-2 Réseau électrique analogue de l'enveloppe du bâtiment [Bertagnolio08].....	118

Figure 5-3 Exemple de bilan schématique de la zone .....	119
Figure 5-4 Exemple de résultat de la procédure BESTEST extrait de [Bertagnolio08] .....	119
Figure 5-5 Comportement temporel schématisé d'un régulateur T.O.R. ....	122
Figure 5-6 Comportement temporel schématisé d'un régulateur T.O.R. ....	122
Figure 5-7 Comportement temporel schématisé d'un régulateur T.O.R. ....	123
Figure 5-8 Loi de consigne en chauffage et en climatisation en fonction de la température intérieure à un instant t.....	124
Figure 5-9 Exemple de principe de la loi de consigne pour la saison hiver / été .....	125
Figure 5-10 Température d'inversion .....	125
Figure 5-11 Efficacité nominale des moteurs électriques [EupVent09].....	126
Figure 5-12 Exemple de facteur de correction du rendement en régime non nominal .....	127
Figure 5-13 Rendement du variateur de vitesse .....	128
Figure 5-14 Exemple de données techniques d'une pompe [WiloT].....	130
Figure 5-15 Identification du BEP à partir des données techniques, adaptée de [WiloT].....	131
Figure 5-16 Efficacité hydraulique d'une pompe [Sfeir05].....	131
Figure 5-17 Point de fonctionnement de la pompe .....	132
Figure 5-18 Modules de calcul de [Morisot00] pour la modélisation d'un échangeur .....	134
Figure 5-19 Schéma de principe d'un échangeur à contre-courant .....	136
Figure 6-1 Schéma bloc du contrôle de la vitesse d'une pompe .....	142
Figure 6-2 Vitesse associée à chaque stratégie de contrôle.....	142
Figure 6-3. Carte des zones climatiques [KeepCool10].....	148
Figure 6-4 Répartition des sous systèmes utilisant un G.P.E.G. en Europe en 1998 [EECCAC03] .....	148
Figure 6-5 Profil d'occupation d'un bureau selon a) [EN15232] b) [IEA48].....	151
Figure 6-6 Profil d'occupation d'une salle de conférence selon [IEA48].....	151
Figure 6-7 Evolution temporelle du besoin de chauffage et de climatisation .....	152
Figure 6-8 Inconfort généré pour une date préprogrammée .....	154
Figure 6-9 Technique de modélisation employée .....	156
Figure 6-10 Variation du rendement en fonction du débit .....	159
Figure 6-11 Technique de modélisation n°1.....	160
Figure 6-12 Technique de modélisation n°2.....	160
Figure 6-13 Temps de fonctionnement cumulé pour le Climat de Paris et bâtiment type 1C, extrait de [Caillet10] .....	161
Figure 6-14 Courbe puissance thermique normalisé / facteur de correction normalisé.....	163
Figure 6-15 Temps cumulé de fonctionnement de la pompe en fonction du débit relatif .....	164
Figure 6-16 Synthèse de la méthodologie d'évaluation de l'indicateur de performance.....	169
Figure 6-17 Répartition des ventes de GPEG par capacité frigorifique [EuPHVAC10] .....	172
Figure 6-18 Pertes de charge de l'évaporateur pour des GPEG certifiés par [Eurovent] .....	172
Figure 6-19 Pertes de charge de ventilo-convecteur certifiés par [Eurovent] .....	173
Figure 6-20 Plan schématique du réseau selon [EN15243].....	174
Figure 6-21 L'analyse des informations.....	176
Figure 6-22 Limites de coût du plan M&V pour notre action .....	177
Figure 6-23 Synthèse de la méthodologie pour l'identification de l'économie d'énergie de la V.V.....	179
Figure 7-1 Evolution temporelle de la température intérieure et des murs en hiver .....	183
Figure 7-2 Inconfort selon un critère de température opérative constante .....	183
Figure 7-3 Besoin thermique horaire en fonction de la température extérieure.....	184
Figure 7-4 Charge thermique en fonction de la température intérieure .....	185
Figure 7-5 Ségrégation de la charge thermique horaire d'un bâtiment de Type 3.....	185
Figure 7-6 Schéma représentatif du contrôle hybride proposé .....	189
Figure 7-7 Températures opératives pour les deux stratégies [Caillet09].....	190
Figure 7-8 Résultat de la performance consommation/confort de la stratégie hybride.....	191
Figure 8-1 Filtre encrassé.....	196
Figure 8-2 Cadre procédural de pré-inspection et d'inspection .....	198
Figure 8-3 Hiérarchie de simplification de la procédure pour évaluer le SEER [EN15243] .....	202
Figure 8-4 Nouvelle représentation de la procédure d'évaluation du SEER.....	203
Figure 8-5 Proposition d'architecture pour l'évaluation de l'efficacité d'une machine frigorifique.....	204
Figure 8-6 Architecture d'évaluation du SEER d'une machine frigorifique en exploitation .....	206
Figure 8-7 Consommation d'un groupe de production d'eau glacée refroidi à l'air avec un encrassement du condenseur et le bâtiment de bureau de Type 1 selon [Bory08].....	207
Figure 8-8 Coefficient correcteur pour la prise en compte d'une correction du débit [EN15241] .....	213
Figure 8-9 Procédure d'évaluation du SSEER avec correction de la maintenance et la conception .....	216
Figure 8-10 Procédure d'évaluation du SSEER avec correction de la régulation.....	217

Figure 8-11 Répartition des postes de consommation pour un GPEG à air et une distribution d'eau pour a) Séville b) Londres ; extrait de [EECCAC03] .....	224
Figure 8-12 Procédure d'évaluation du SSEER et du système de régulation.....	226
Figure 8-13 Principe de calcul du SSEER par défaut de mesure .....	228
Figure 8-14 Procédure d'évaluation de l'efficacité globale du système de climatisation .....	229
Figure 8-15 Erreur relative pour une utilisation indépendante des améliorations pour les bâtiments existants non rénovés, calculée d'après [Keepcool10].....	241
Figure 8-16 Erreur relative pour une utilisation indépendante des améliorations pour un bâtiment de type 2, calculée d'après [Grignon10] .....	242



# Introduction

Le protocole de Kyoto impose à ses signataires de réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. Une des solutions afin d'y parvenir est de réduire la consommation énergétique, les bâtiments tertiaires étant l'un des secteurs sur lequel des économies semblent possibles. Comme le souligne l'étude EECCAC [EECCAC03], la surface climatisée devrait probablement croître de 2000 Mm<sup>2</sup> à environ 3000 Mm<sup>2</sup> en Europe entre 2007 et 2020. L'âge du parc fait que de plus en plus de systèmes de climatisation ont besoin d'être remplacés ou rénovés (après 10 ou 15 ans d'exploitations). Il y a donc aujourd'hui une opportunité d'économies d'énergie à saisir en climatisation, ce qui pourrait ainsi contribuer au respect des objectifs du protocole de Kyoto.

L'objectif de ce travail est de proposer une méthodologie générique permettant d'identifier, pour les systèmes de climatisation à eau glacée, des économies d'énergie possibles à un instant donné. Ce potentiel d'économies résulte du vieillissement ou de l'obsolescence du matériel ou bien encore de tout défaut relatif à l'installation. Par ailleurs, les solutions proposées doivent permettre de respecter continuellement le confort des occupants du bâtiment. L'ensemble des évolutions techniques pourra être examiné grâce à notre méthodologie lors de leurs apparitions futures sur le marché.

Dans le cadre de notre étude, des solutions existent et sont actuellement disponibles auprès des praticiens. Toutefois, beaucoup d'entre eux, lors d'une rénovation, se contentent de remplacer les équipements en place par de nouveaux quasiment identiques. Le maître d'ouvrage veut que le confort soit assuré dans son bâtiment afin de satisfaire les occupants. Le maître d'œuvre se voit confier la responsabilité de satisfaire les besoins du maître d'ouvrage en limitant souvent le coût de modification de l'installation. La modification du bâtiment et du système existants peut engendrer un coût supplémentaire. Ce coût de rénovation et l'innovation peuvent être perçus comme des risques par le maître d'ouvrage tout comme pour le maître d'œuvre, les deux parties souhaitant « maintenir » le système existant qui a déjà fait ses preuves. La méthodologie proposée est élaborée dans le but d'inciter les deux parties à améliorer le bâtiment et le système existants.

*Comment les politiques européennes tentent elles de « guider » les praticiens dans leur choix ?*

Dans ce contexte, la Directive Européenne sur la Performance Energétique des Bâtiments (DPEB) [DPEB02] propose un cadre aux Etats Membres pour améliorer la performance énergétique des bâtiments de leur pays. Elle impose à cet effet la mise en place d'une certification énergétique des bâtiments, qui se traduit en France par le Diagnostic de Performance Energétique (DPE). Cet étiquetage de la performance prend en compte globalement le bâtiment et les équipements. D'autres dispositifs, comme l'article 8 et l'article 9, se concentrent sur la performance des équipements intégrés aux bâtiments qui assurent le confort des occupants. L'article 8 et l'article 9 imposent respectivement l'inspection des systèmes de chauffage et de climatisation.

L'article 9 de cette directive requiert, entre autre, l'inspection périodique des systèmes de climatisation. Notre travail peut s'inscrire dans ce dernier contexte. Cet article impose aux Etats Membres, « *de prendre les mesures nécessaires pour assurer une **inspection régulière** des parties accessibles d'un système de climatisation d'une puissance effective supérieure à 12kW. Cette inspection doit inclure une **évaluation de l'efficacité de l'installation et de son dimensionnement**. Les utilisateurs doivent également être conseillés sur le remplacement ou sur des modifications à apporter au système de climatisation. Cette alternative peut comporter une inspection pour évaluer l'efficacité et le dimensionnement du système de climatisation.* » Cette inspection représente un

premier pas vers l'amélioration de l'efficacité énergétique du bâtiment comme le DPE. Cette inspection peut utiliser un ensemble de points de contrôle répertoriés dans une liste de vérification [EN 15240]. Des mesures ponctuelles peuvent être effectuées sur les différents appareils techniques constituant l'installation.

Cependant, aucune obligation législative n'est pour l'instant établie pour imposer la mise en place des améliorations identifiées. Dans le même temps, la décision d'un investissement important afin d'améliorer l'existant est un blocage dans la prise de décision. Toutefois, la certification d'un bâtiment étant obligatoire, le propriétaire doit fournir au futur locataire un état des lieux de l'énergie consommée, et pour les bâtiments publics, celui-ci doit être rendu public. Ainsi, le propriétaire peut promouvoir la qualité de son bâtiment en termes de consommation et rendre plus attractif la location de son bien. L'attrait financier reste le plus sûr moyen de sensibiliser les décideurs aux économies d'énergie.

D'autre part, les fabricants d'équipements sont contraints à développer des produits dont une efficacité minimale ou une consommation maximale doit être respectée pour accéder au marché européen [Ecodesign09].

*Comment les politiques nationales et le secteur privé visent-ils à augmenter l'investissement en faveur de l'efficacité énergétique ?*

Le secteur privé peut proposer un service aux maîtres d'ouvrage. Afin de garantir ou réduire les risques d'un investissement important, effectué dans le but de réduire les coûts d'exploitation de son installation, le maître d'ouvrage peut s'appuyer sur une société de service d'efficacité énergétique à l'aide d'un contrat de performance énergétique. Ces prestataires doivent, pour minimiser leurs risques et trouver des financements, faire appel, eux aussi, à une méthodologie d'inspection et d'audit.

D'un autre côté, le gouvernement Français a mis en place un mécanisme de certificats d'économie d'énergie encore appelés certificats blancs. « *Le principe des certificats d'économie d'énergie repose sur une obligation de réalisation d'économies d'énergie imposée par les Pouvoirs Publics sur une période donnée aux vendeurs d'énergie (...) Liberté et créativité sont laissées aux vendeurs d'énergie pour choisir les actions qu'ils vont entreprendre (...) En contrepartie du constat des investissements effectués par les consommateurs grâce à ces actions, les vendeurs d'énergie reçoivent des certificats sur la base de forfaits en kWh calculés par type d'action.* » [Certif09]. Ainsi, les fournisseurs d'énergie doivent pouvoir détecter des améliorations possibles dans un bâtiment existant afin de proposer des solutions à leurs clients. Une méthodologie d'identification d'économie d'énergie peut répondre à ce besoin pour inciter leurs clients à investir.

De plus, l'article 119 de la loi dite Boutin 2009 [Boutin09] vise à inciter les propriétaires de logements à investir en incluant un possible partage des coûts de rénovation. Lorsque des travaux d'amélioration sont réalisés par le bailleur dans les parties privatives d'un logement ou dans les parties communes d'un immeuble, une contribution pour le partage du coût des travaux peut être demandée au locataire sous réserve qu'une réduction des charges lui bénéficie. Cette contribution n'est exigible qu'à la condition qu'un ensemble de travaux ait été réalisé pour que le logement atteigne un niveau minimal de performance énergétique. Cette participation, limitée au maximum à quinze ans, est inscrite sur l'avis d'échéance et portée sur la quittance remise au locataire. Son montant, fixe et non révisable, ne peut être supérieur à la moitié du montant de l'économie d'énergie estimée. Dans ce mécanisme, on voit mal un propriétaire ou un locataire néophyte proposer les solutions adéquates à son bâtiment. Une méthodologie d'identification d'économie d'énergie peut répondre à ce besoin en incitant les deux parties à investir, par exemple à l'issue d'une inspection.

Ces trois mécanismes financiers permettent d'inciter les différents acteurs à investir dans des solutions. Mais ils requièrent une expertise plus ou moins poussée. Grâce à



une méthodologie adaptée, les acteurs pourront conseiller efficacement les investisseurs.

### *Quelles sont les solutions de rénovation identifiées ?*

Comme nous l'avons précisé auparavant, certaines législations contraignent un concepteur dans sa sélection des équipements et ce, en imposant certaines valeurs minimales d'efficacité. Mais bien évidemment ce n'est pas le seul défaut identifiable par un inspecteur ou un auditeur pour améliorer l'efficacité d'un système énergétique. Une définition précise de ce que représente un défaut est donc nécessaire. Dans notre travail, l'étude des défauts concerne d'abord la réalisation de l'objectif principal d'un système, celui permettant d'assurer l'ambiance exigée par l'utilisateur. Toutefois le contexte économique et environnemental impose de rester compétitif, tout en minimisant l'impact énergétique des systèmes. Partant de ces constats, la recherche de défauts concerne deux types de catégories :

- Les **défauts fonctionnels** qui engendrent une **perte de la fonction principale**. Une ou plusieurs parties défectueuses du système ne permettent pas le fonctionnement du système.
- Les **défauts énergétiques** qui **n'altèrent pas la fonction principale** mais qui se traduisent par une **efficacité énergétique non optimale**. Dans ce cas, des référentiels doivent être établis pour examiner le potentiel d'amélioration du système existant.

Le diagnostic des défauts fonctionnels est assuré par les professionnels, nous limitons le cadre de l'étude au deuxième point, afin de permettre à l'avenir de prendre en compte la conséquence de la présence d'un défaut énergétique.

### *Qu'appelle-t-on une inspection et un audit ?*

Le travail d'un inspecteur ou d'un auditeur lui impose, tout d'abord, de pouvoir **appréhender** une installation sur un site existant, c'est-à-dire de pouvoir **analyser l'exploitation, la maintenance et la conception** des équipements installés.

La seconde étape de son travail consiste à puiser, dans la connaissance d'un univers de solutions techniques, les solutions qui lui semblent adaptées. Une définition de ces solutions potentiellement identifiées est donc nécessaire.

La troisième étape de son travail consiste à identifier les solutions applicables à un bâtiment et à un système particulier.

La quatrième étape de son travail consiste à évaluer ces solutions.

En se basant sur ces différentes étapes, il doit alors pouvoir conseiller un exploitant, un manager ou un propriétaire sur les solutions d'amélioration applicables et adaptées à leurs bâtiments et leurs systèmes.

Partant de ces constats, définissons, de manière succincte, ce que pourraient être une pré-inspection, une inspection et un audit :

- Une **pré-inspection** comprend au minimum la collecte de données disponibles sans effectuer la visite du site. Ces informations sont récupérées auprès du propriétaire, du gestionnaire et de la société d'exploitation qui a la charge de l'installation. Cette pré-inspection devrait être effectuée avant toute inspection.
- Une **inspection** inclut le travail déjà effectué pendant la pré-inspection et devrait établir, à l'aide d'une visite du site et des mesures expérimentales simples et rapides, une vision globale sur la performance énergétique du système ainsi que la qualité de l'ambiance produite par le système.



- Un **audit** peut débuter lorsque l'inspection a indiqué une performance énergétique inacceptable dans une ou plusieurs zones du bâtiment. Cette méthodologie est plus complexe que la méthodologie d'inspection. En effet, celle-ci s'ajoute à la description plus qualitative d'une inspection. Elle comporte, entre autres, des vérifications qui sont normalement en dehors des compétences d'un inspecteur. Le but est d'identifier là où se trouvent les problèmes et les économies potentielles pour que le propriétaire puisse faire appel à une société afin de mettre en place les solutions adéquates.

Mais chaque société, qui utilise des méthodologies d'identification d'économies d'énergie, peut décider de mélanger ces trois procédures. Il est donc nécessaire de présenter un cadre méthodologique pour permettre de formuler des procédures applicables et ce, en fonction de certains critères.

*Quelles sont les méthodes existantes permettant de faciliter la mise en œuvre des mécanismes incitatifs ?*

Une méthodologie d'inspection et d'audit est proposée dans [Krarti01]. L'auteur cite différents outils et méthodes à disposition d'un auditeur pour évaluer la performance énergétique de bâtiments existants et les économies possibles. Cependant ce type de méthodologie se base uniquement sur les connaissances expertes de l'auditeur pour sélectionner les outils d'évaluation ou encore pour identifier des améliorations. En 1996, un ensemble de chercheurs a fait l'expérience de faire auditer un ensemble de bâtiments par quatre entreprises différentes [Helcke96]. Cette expérience a démontré une disparité des conclusions obtenues quant aux solutions proposées pour diminuer la consommation. Ces approches méthodologiques semblent donc dépendre fortement du niveau de compétence et de l'expérience de l'inspecteur et/ou de l'auditeur.

L'approche d'inspection réglementaire basée essentiellement sur [EN15240], qui se veut être à faible coût et aux résultats invariants en fonction de l'inspecteur, se centre principalement sur des points de contrôle. Mais aucun lien précis n'est créé entre ces points de contrôle et des conseils qualitatifs ou quantitatifs, et encore moins pour un bâtiment ou un système particulier.

Malgré ces approches méthodologiques, et malgré celle développée pour une inspection dans [EN15240], les besoins de méthodes sont importants pour soutenir les mécanismes incitatifs promouvant l'efficacité énergétique.

Pour créer ce lien entre les points de contrôle et les conseils d'amélioration, nous avons structuré notre réflexion en tentant d'apporter des réponses aux quatre questions suivantes :

- *Quelles sont les connaissances minimales nécessaires à un inspecteur ou un auditeur ?*
- *Que cherche-t-on à identifier pour améliorer un système de climatisation ?*
- *Comment réussir à identifier et évaluer les économies ?*
- *En fonction de l'objectif de l'évaluation, quels sont les moyens techniques et humains à mettre en œuvre ?*

*Quelles sont les connaissances minimales qu'un inspecteur ou un auditeur doit connaître ?*

Dans le chapitre 1, nous proposons dans notre travail de mettre en place le socle de connaissances qu'un auditeur ou un inspecteur doit acquérir pour appréhender un système existant. C'est-à-dire que nous proposons d'introduire les connaissances permettant de **reconnaître** une installation sur un site existant, **d'analyser son fonctionnement** et de comprendre les facteurs influençant le **dimensionnement** des équipements.

*Que cherche-t-on à identifier pour améliorer un système de climatisation ?*

Dans la suite de notre travail, nous utilisons le terme **opportunités** pour créer le lien entre **les améliorations** potentielles identifiables et **les actions associées visant à supprimer les défauts énergétiques**. Dans le chapitre 2, nous nous proposons alors de formaliser une démarche permettant **d'établir un référentiel d'opportunités** en analysant et en explicitant **les facteurs d'inefficacité** du système pendant son **cycle de vie**. Nous analysons ensuite une liste d'options d'amélioration. Afin d'illustrer l'application de la démarche précédente, nous explorons les différentes fonctions et postes du système, cherchons les causes d'inefficacité pour les différentes phases du cycle de vie puis nous les relient à certaines opportunités de cette liste. Pour réaliser cette tâche, nous nous appuyons sur les connaissances pré-requises d'un inspecteur ou d'un auditeur.

*Comment réussir à identifier et évaluer les économies qui incitent à un investissement ?*

Dans le chapitre 3, nous cherchons alors à formaliser une **méthodologie d'identification de solutions** d'amélioration. Pour cela, nous analysons différentes méthodes permettant l'identification de ces solutions. Le premier type de méthode propose d'utiliser des indicateurs pour identifier des options d'amélioration. La seconde méthodologie propose d'identifier des défauts de maintenance et les options d'amélioration associées. La troisième méthode, l'inspection normative existante [EN15240], propose de définir un protocole de récupération de données. L'analyse de ces méthodes nous permet alors de montrer la nécessité de les utiliser d'une façon complémentaire pour obtenir des résultats de qualité. Nous répertorions ensuite différents critères d'identification possibles et analysons plus en détail comment élaborer des indicateurs quantitatifs. Mais la plupart de ces critères et indicateurs restent à spécifier en fonction du **contenu procédural** donné pour une pré-inspection d'inspection ou d'audit.

Dans le chapitre 4, pour formaliser des procédures d'identification d'économies d'énergie, nous complétons ensuite les méthodes d'identification par des **méthodes d'évaluation quantitative** adaptées à des moyens techniques et humains en fonction de la précision escomptée.

*En fonction de l'objectif de l'évaluation, quels sont les moyens techniques et humains ?*

Nous proposons alors d'analyser en détail les contraintes procédurales et les méthodes d'évaluation utilisables par un inspecteur ou un auditeur pour formuler des procédures adaptées aux moyens techniques et humains et à l'objectif de l'évaluation.

Pour examiner ces moyens, il est alors envisageable d'analyser les contraintes à travers lesquelles les sociétés doivent proposer leurs services. Cette analyse peut s'effectuer en examinant les contraintes comme les obligations contractuelles qui permettent à des sociétés de garantir les économies d'énergie. L'analyse de ces méthodes concurremment aux moyens techniques et aux informations disponibles (mesures et

données techniques) permet alors d'adapter celles-ci aux différentes phases d'un projet d'amélioration. Mais il est également nécessaire de prendre en compte **le coût et la précision** de la procédure pour que la procédure soit cohérente et adaptée à un projet d'amélioration particulier.

L'analyse effectuée dans le chapitre 4, nous conduit par conséquent à proposer une **sélection de modèles** d'équipement et d'enveloppe de bâtiment. Ces modèles d'évaluation sont présentés, dans le chapitre 5, en réponse à certaines opportunités que nous avons pris le soin d'introduire dans notre référentiel d'opportunités.

Dans le chapitre 6, nous appliquons ensuite notre méthodologie d'identification d'économies d'énergie à un **niveau spécifique** : l'exploitation du système de pompage du réseau d'eau glacée d'un bâtiment. Nous avons alors mis au point des procédures d'identification d'économies d'énergie applicables à ce système.

Puis, dans le chapitre 7, nous évaluons des options d'amélioration pouvant **impacter le confort** de l'occupant positivement et négativement. Nous nous attachons alors à quantifier ce confort et les gains énergétiques escomptés pour un bâtiment représentatif du parc français. Nous formulons des méthodes applicables par les exploitants pour les durées de chauffage et de climatisation.

Enfin, comme nous l'avons fait remarquer auparavant, le mécanisme d'inspection réglementaire n'est pas totalement abouti. Dans le chapitre 8, nous proposons donc d'identifier toutes les limites du mécanisme d'inspection réglementaire à son stade actuel de développement. La disponibilité des informations étant le levier principal pour augmenter la qualité des conclusions obtenues, nous appliquons notre méthodologie à **un niveau global** et ce, pour améliorer l'évaluation qualitative existante de la performance globale du système. L'évaluation quantitative que nous proposons, **rapide et peu coûteuse** en termes humain et matériel, prend en compte les spécificités d'un bâtiment et d'un système inspectés. Parmi les spécificités sélectionnées, nous mettons l'accent sur le régime de maintenance, le système de régulation, la performance individuelle des équipements et les améliorations effectuées pour réduire les besoins thermiques.





## Chapitre 1 De la conception à l'exploitation des systèmes de climatisation à eau glacée

Chaque bâtiment est conçu de manière unique selon un cahier des charges précis, sur lequel le concepteur s'appuie pour proposer un ensemble cohérent d'équipements techniques. La connaissance du concepteur lui permet de proposer des schémas plus ou moins élaborés.

Le titre de ce chapitre indique la mise en œuvre d'une démarche de réhabilitation entière des systèmes permettant d'assurer le confort des occupants. Cette approche itérative contient les éléments suivants :

- La définition des conditions de confort (température et hygrométrie)
- L'estimation de la charge thermique
- La sélection et le dimensionnement des équipements de production (groupe de production d'eau glacée), des échangeurs (centrale de traitement de l'air, ventilo-convecteurs, ..) et des équipements du réseau de distribution (tuyauterie, architecture, vannes, pompes...)

Puis, le système conceptuel est installé et exploité tout en assurant sa maintenance.

Toutefois l'approche utilisée dans ce chapitre a pour vocation de permettre à l'auditeur ou à l'inspecteur de pouvoir **reconnaître** une installation sur un site existant, **d'analyser son fonctionnement** et de comprendre les facteurs influençant la **sélection et le dimensionnement** des équipements.

Dans un premier temps nous examinons la conception architecturale des réseaux aéraulique et la conception architecturale des réseaux hydraulique.

Nous développons alors le lien entre le choix que le concepteur a fait au niveau de l'architecture des réseaux et les répercussions au niveau de l'exploitation du système. Nous analysons donc les techniques courantes utilisées pour exploiter un système.

Puis, nous examinons les éléments sur lesquels s'appuie un concepteur pour sélectionner et dimensionner les différents composants techniques d'une installation.

Nous analysons ensuite les différents types d'actions de maintenance nécessaires pour maintenir le système.

Enfin, nous introduirons la notion de confort thermique sur laquelle l'inspecteur ou l'auditeur doit s'appuyer pour vérifier si la fonction principale du système est assurée, c'est-à-dire si le confort de l'occupant est respecté.

## 1.1 Reconnaissance d'un système : typologie d'un système

La première étape d'un inspecteur ou d'un auditeur est de reconnaître le système qu'il devra analyser.

Nous introduisons dans cette partie une typologie sommaire des différentes architectures des systèmes de climatisation qui permettent de contrôler la température d'air dans une ou plusieurs zones thermiques du bâtiment.

### 1.1.1 Typologie selon le vecteur de froid

Afin de répondre aux besoins thermiques d'un bâtiment, la chaîne énergétique entre la consommation d'un vecteur énergétique (gaz, électricité, fioul, solaire, biomasse,...) et le chauffage ou la climatisation d'un local, peut être examinée en considérant deux grands types de système :

- **Les systèmes de production centralisée à air et à eau** : dans ce cas la production et la distribution d'un ou plusieurs vecteurs énergétiques (eau et/ou air) permettent d'alimenter une ou plusieurs zones du bâtiment.
- **Les systèmes à détente directe** : dans ce cas un circuit frigorifique plus ou moins complexe est utilisé pour rafraîchir et/ou chauffer une ou plusieurs zones du bâtiment, les systèmes les plus complexes étant ceux à débit de réfrigérant variable et les plus simples les split-system.

Dans notre travail, nous limiterons notre étude aux systèmes à air et à eau. Ainsi, pour le premier type de système, le réseau de distribution peut être raccordé à plusieurs types de systèmes de traitement d'air :

- **Un système de traitement d'air centralisé** : le réseau de distribution hydraulique est utilisé pour refroidir ou chauffer de l'air qui est à son tour redistribué par un réseau de distribution aéraulique dans une ou plusieurs zones du bâtiment.
- **Un système de traitement d'air décentralisé** : le réseau de distribution hydraulique est directement utilisé pour refroidir ou chauffer l'air dans chacune des zones du bâtiment.
- **Un système de traitement d'air mixte** : le réseau de distribution hydraulique est utilisé à la fois pour refroidir ou chauffer de l'air redistribué ensuite par un réseau aéraulique mais également pour assurer un traitement local de la température au niveau d'une ou plusieurs zones.

Les systèmes de traitement d'air ainsi définis peuvent desservir une ou plusieurs zones du bâtiment. Cette distinction permet de comprendre l'interaction entre l'architecture des réseaux hydrauliques d'eau chaude/d'eau glacée et l'architecture du réseau aéraulique.

### 1.1.2 Systèmes mono-zone et systèmes multi-zones

Un système mono-zone est défini comme un système de traitement d'air desservant une zone unique. Il existe généralement deux types de systèmes mono-zone pour les systèmes à eau glacée. Le premier type de système est constitué par une centrale de traitement de l'air qui peut filtrer, humidifier, déshumidifier, chauffer et refroidir l'air. Le second est constitué d'unités terminales, l'air neuf étant simplement introduit à l'aide d'un système de ventilation mécanique contrôlée (VMC) simple flux ou double flux.

Un système multi-zones alimente des zones de traitements multiples comportant des charges distinctes.

### 1.1.3 Exemples courant d'architectures multizones

Nous présentons dans les paragraphes suivants des systèmes multizones que l'on rencontre de façon régulière.

### 1.1.3.1 CTA et traitement terminal

La centrale de traitement d'air (CTA) comporte une batterie chaude et une batterie froide en série, l'air est prétraité en centrale et est distribué à débit constant à toutes les zones où des unités terminales peuvent assurer le confort local. La meilleure solution de régulation pour la CTA est de préparer un air qui satisfasse la zone aux charges les plus faibles, c'est à dire présentant la température de soufflage la plus élevée en été et la plus basse en hiver. La Figure 1-1 reprend schématiquement un exemple de ce type d'installation.

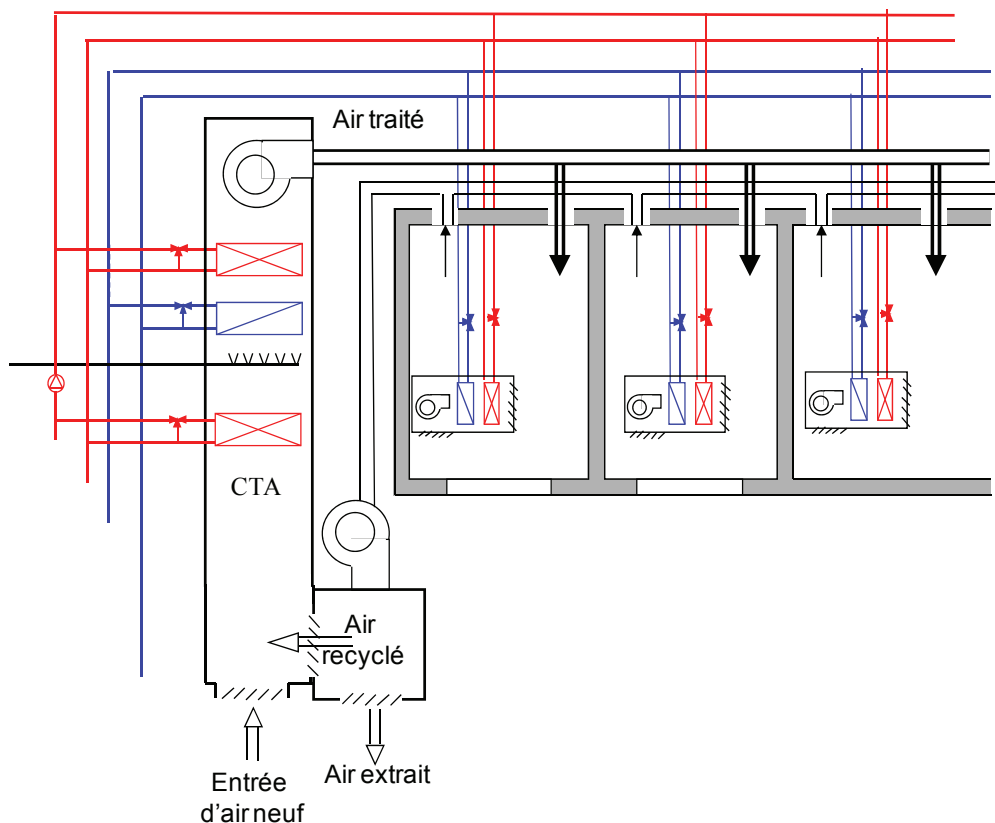


Figure 1-1 CTA multi-zones avec traitement terminal<sup>1</sup>

### 1.1.3.2 CTA primaire et CTA secondaires

Une centrale d'air neuf est associée à des centrales d'air mélangé. L'air neuf est préparé dans une centrale spécialisée commune à plusieurs zones (CTA primaire). Elle alimente en air neuf traité les CTA chargées de maintenir les conditions spécifiques de chaque zone (CTA secondaire). La CTA primaire prépare soit l'air neuf à une température fixe (environ 14°C) soit variable en fonction de la température extérieure. Les CTA secondaires sont régulées de la même manière que la CTA mono-zone. Le débit d'air de la CTA primaire varie en fonction des charges thermiques des CTA secondaires. La figure ci-dessous reprend schématiquement un exemple de ce type d'installation.

<sup>1</sup> Notons que dans le schéma de Figure 1-1, la CTA est à air recyclé. Cependant il est possible de rencontrer plusieurs types de CTA, par exemple fonctionnant en tout air neuf (voir CTA primaire de la Figure 1-2) ou disposant d'un moyen de récupération de chaleur avec un échangeur rotatif (voir Figure 1-3) ou encore avec récupérateur de chaleur à courants croisés.



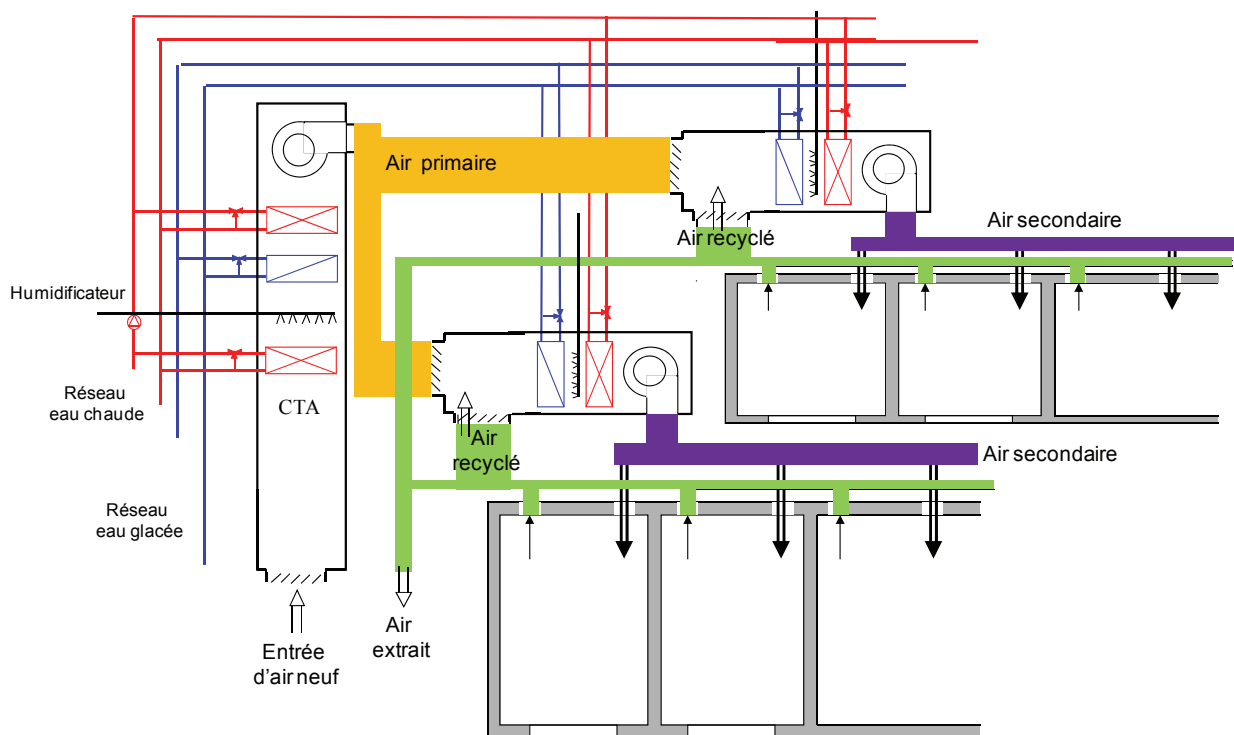


Figure 1-2 Système avec CTA primaire et secondaire (voir note en bas de la page 27)

### 1.1.3.3 Débit variable à 1 conduit

Pour ce type de système, le but est de fournir un débit adapté pour répondre à la charge thermique de chacun des locaux. Des clapets sont régulés pour maintenir les conditions d'ambiance des locaux. En fonction de l'ouverture et de la fermeture de ces clapets, le débit de la centrale est ajusté. Des batteries positionnées après ces registres peuvent assurer un traitement terminal pour des conditions spécifiques de température.

La Figure 1-3 reprend schématiquement un exemple de ce type d'installation.

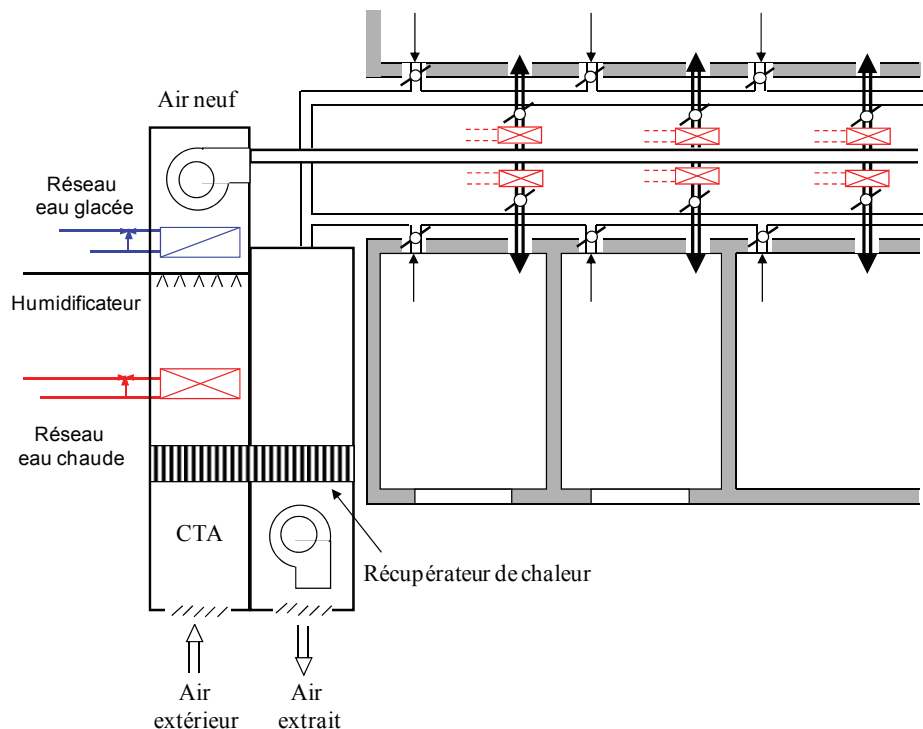


Figure 1-3 Système à débit variable (voir note en bas de la page 27)

## 1.2 Comment exploiter un système : la régulation et les techniques d'exploitation

Un système de climatisation et un système de chauffage sont installés dans un bâtiment pour assurer le confort des usagers du bâtiment. La majorité des systèmes permettent d'assurer ce confort en contrôlant la température d'air intérieur. Cette température peut être mesurée à l'aide d'une sonde de température judicieusement positionnée dans la zone à climatiser, ou bien encore au niveau du conduit de l'air extrait. Cette dernière solution permet alors de connaître la température de la zone traitée en admettant que l'air est suffisamment mélangé à l'intérieur de la zone. Les systèmes de traitement de l'air permettent alors de modifier la température intérieure jusqu'à atteindre la consigne désirée. La consigne locale peut être modifiée de façon centrale par l'exploitant au niveau d'un régulateur ou de façon locale par les usagers.

L'architecture spécifique d'un réseau de climatisation et de chauffage implique l'utilisation d'un système de production de chaleur et de froid. Ces systèmes doivent être exploités et régulés afin d'atteindre le plus bas niveau de consommation tout en respectant le confort des occupants. Par exemple, l'optimisation énergétique d'un bâtiment doit prendre en compte le moment à partir duquel la production de froid et celle de chaud doivent être arrêtées pour supprimer toute dépense inutile à un niveau central. D'une part, les auxiliaires associés pourront être mis à l'arrêt ainsi que le groupe de production d'eau glacée ou la chaudière pour limiter la consommation due aux veilles. Et d'autre part, pour certains systèmes à architecture spécifique, il s'agit d'éviter la production de chaud et de froid sur des intervalles de temps resserrés.

Le contrôle local de la température permet quant à lui d'assurer le confort de l'occupant. La notion de respect du confort de l'occupant peut être définie à l'aide de norme en utilisant des limites de confort [EN15251]. Ces limites nous autorisent à élaborer de nouvelles stratégies permettant de limiter les consommations d'un bâtiment.

Les règles d'exploitation influencent directement la production d'eau glacée en intervenant sur la demande de froid comme sur la demande de chauffage. De plus la charge thermique, donc indirectement la production de froid, est dépendante des éléments suivants :

- Le climat
- Les charges internes
- Les caractéristiques géométriques et thermiques du bâtiment

La définition des modes d'exploitation est donc une problématique qui a des conséquences sur la consommation des bâtiments. Celle-ci peut être examinée d'un point de vue réglementaire, dans une phase de conception mais également en phase d'exploitation pour un système de climatisation existant.

### 1.2.1 Le contrôle central : mode été / hiver

Lorsque le chauffage et le rafraîchissement sont assurés à l'aide d'échangeur(s) air / eau, des spécificités apparaissent pour l'organisation des réseaux d'eau. Une typologie de cette sous-architecture est établie dans la partie 1.3. En effet, certains systèmes doivent être associés ou dissociés pour permettre de chauffer ou de refroidir la zone considérée. Pour les bâtiments existants, il est possible de rencontrer un système de contrôle indépendant pour le chauffage et le refroidissement. La commutation (ou encore inversion) du chauffage au refroidissement s'effectue centralement au moyen de vannes. Cette commutation peut s'effectuer automatiquement, par un régulateur piloté par la température extérieure, ou manuellement par le manager du bâtiment ou pendant une opération de maintenance.

### 1.2.2 Le contrôle local, une spécificité de chaque système

Pour chacun des systèmes décrits aux paragraphes 1.1.2 et 1.1.3, l'architecture de ceux-ci prévoit l'utilisation d'un ensemble d'échangeurs (air / eau) pour assurer les conditions d'ambiance intérieures. Ainsi, quelle que soit l'architecture du système (mono-zone / multi-zones) et pour un système à air primaire, il est nécessaire de s'intéresser à la manière technologique du transfert de chaleur à l'air pour comprendre comment sont pilotés les différents organes d'un système de traitement de l'air.

Pour tous ces réseaux, l'air primaire est traité pour maintenir une certaine température de soufflage et assurer un débit minimal hygiénique, voire une hygrométrie contrôlée. Lorsqu'un traitement local est envisagé (unités terminales), les thermostats d'ambiance de chaque pièce contrôlent alors localement la température en pilotant les vannes d'alimentation de(s) l'échangeur(s) (servo-moteur) et/ou bien encore par variation de vitesse du ventilateur (ventilo-convecteur).

## 1.3 Comprendre la régulation et l'architecture centrale de la distribution d'eau

Ces bases préalables étant posées, il est possible d'organiser chacun de ces systèmes typiques autour d'architectures de réseau d'eau<sup>2</sup>.

Dans cette partie, nous recherchons à analyser l'architecture permettant d'associer ou de dissocier la production de froid à celle de chaleur (architecture centrale). Dans la partie 1.4, nous examinerons l'architecture des solutions techniques mises en œuvre afin de transférer l'énergie d'un bout à l'autre du circuit d'eau indépendamment de l'usage de la chaleur ou du froid (architecture locale).

### 1.3.1 Installation 2 tubes sans inversion

Dans ce type d'installation, les unités terminales ne sont alimentées que par de l'eau glacée. L'air primaire fourni par une centrale de traitement de l'air assure la fonction de chauffage. Il est également envisageable d'ajouter localement un ensemble de radiateurs.

Une loi d'air et une loi d'eau peuvent être utilisées pour prendre en compte l'effet de la température extérieure sur la charge thermique des locaux. Nous avons représenté schématiquement un exemple pour ces deux lois à la Figure 1-4.

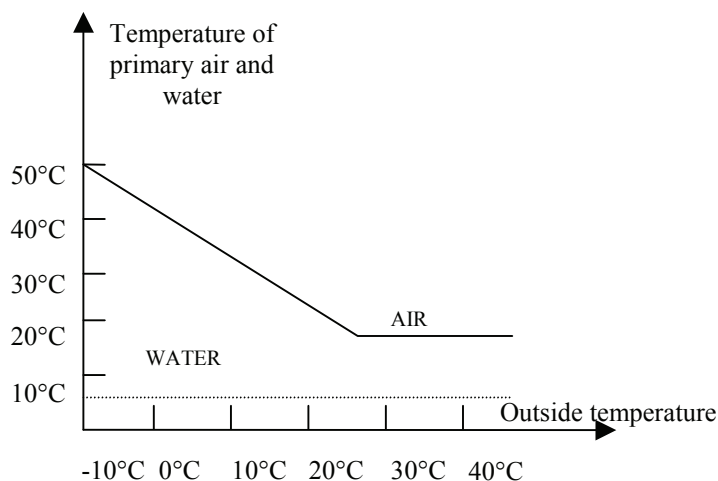


Figure 1-4 Loi d'eau et d'air pour un système deux tubes sans inversion

La fonction de chauffage et de froid peut donc s'effectuer simultanément si on ne calibre pas les deux thermostats, ou s'il n'existe pas de bande morte entre la consigne en chaud et en froid.

Une zone thermique peut être identifiée pour déterminer le moment où il n'est plus nécessaire d'utiliser la chaudière et le groupe de production d'eau glacée. Ce moment peut être calculé pour éviter tout gaspillage énergétique. Nous reviendrons sur ce point au paragraphe 1.8.2.

### 1.3.2 Installation 2 tubes à inversion

Dans ce type d'installation, les unités terminales sont soit alimentées par de l'eau glacée, soit par de l'eau chaude. L'air primaire fourni par une centrale de traitement de l'air assure la fonction de chauffage. Il est également envisageable d'ajouter localement un ensemble de radiateurs.

<sup>2</sup> Dans notre travail, nous n'aborderons pas la technologie 2 tubes / 2 fils

L'installation d'un système à 2 tubes à inversion suppose que l'on soit dans un des cas suivants :

- Le système est un système à mélange (sans échangeur de chaleur)
- Le système sépare physiquement les deux circuits d'eau, mais un échangeur est utilisé pour transférer la chaleur au circuit alimenté par l'eau glacée pour la batterie de traitement de l'air.

Pour un système à mélange, des vannes d'inversion sont utilisées. Ainsi il peut y avoir circulation dans le secondaire aussi bien de l'eau chaude que de l'eau glacée provenant respectivement des 2 circuits primaires d'eau. La Figure 1-5 présente un exemple pour ce type d'architecture. Dans cet exemple, lorsque le mode froid est sélectionné, la pompe du réseau d'eau chaude est éteinte, la vanne deux voies du réseau d'eau chaude est fermée, la vanne d'eau froide est complètement ouverte, et la vanne trois voies est positionnée pour obturer le réseau d'eau chaude. Ces trois vannes sont les vannes d'inversion de ce système.

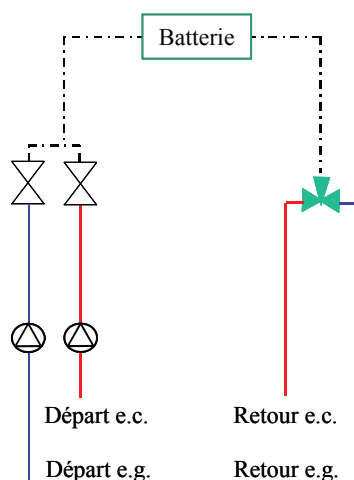


Figure 1-5 Schéma de principe d'un système à inversion à mélange

Pour un système à inversion à échangeur, il n'y a pas mélange d'eau entre les 2 circuits. La Figure 1-6 présente un exemple pour ce type d'architecture. Pendant la saison estivale, la vanne trois voies du réseau d'eau glacée est positionnée pour bypasser l'échangeur du circuit d'eau chaude, la pompe du réseau d'eau chaude peut être arrêtée. Pendant la saison de chauffage, le positionnement de la vanne trois voies permet de bypasser le circuit primaire d'eau glacée. La pompe du circuit secondaire doit rester en fonctionnement toute l'année.

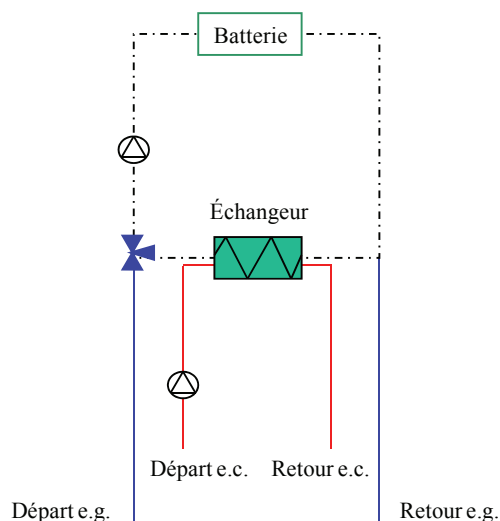


Figure 1-6 Schéma de principe d'un système à deux tubes à inversion avec échangeur

Dans ces 2 cas, il est nécessaire de connaître la température d'inversion pour chaque zone traitée (circuit secondaire). Le contrôle de la température d'air et d'eau inclut l'utilisation d'une plage de transition pour la saison intermédiaire (Figure 1-7). La température d'inversion du système est ici primordiale car elle est intrinsèque à ce type d'architecture. La loi d'air et la loi d'eau intègrent donc la connaissance de la température d'inversion.

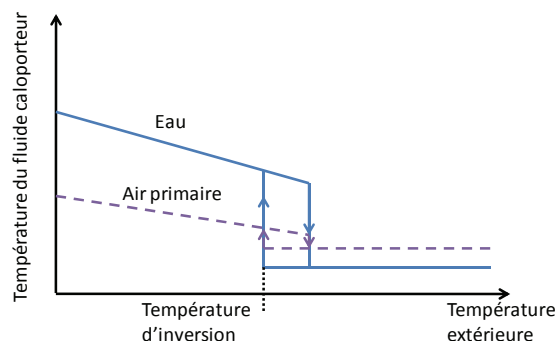


Figure 1-7 Exemple de loi d'air et d'eau pour un système 2 tubes à inversion

Une correction de la température de la boucle d'eau chaude en fonction de la température extérieure est également utilisée dans cet exemple.<sup>3</sup>

Une élévation progressive de la température de la boucle d'eau froide pourrait être imaginée de manière analogue.

### 1.3.3 Systèmes à 3 tubes

Un système à trois tubes est constitué de deux tubes pour l'arrivée de l'eau chaude et de l'eau froide et d'un retour commun. Il y a donc un risque de mélange par manque d'autorité des vannes. Ce système n'est plus utilisé et ne devrait plus l'être.

### 1.3.4 Systèmes à 4 tubes

Chaque échangeur, placé en CTA ou en unité terminale, est raccordé par des circuits séparés au réseau d'eau chaude et au réseau d'eau froide.

Pour les unités terminales à deux batteries, les distributions d'eau chaude et d'eau froide sont réglées centralement à des températures adaptées aux charges du moment : température d'eau chaude en correspondance avec la température extérieure, température d'eau froide fixe ou évolutive [Cyssau95].

L'utilisateur peut donc chauffer ou refroidir quel que soit le moment de l'année. Le contrôle de la température d'eau chaude et d'eau glacée se fait ainsi de manière indépendante (voir Figure 1-8). Cependant, pour ce type de système, il est donc envisageable de définir une saison de chauffage et de climatisation distincte et ce, sans altérer le confort des occupants. Nous reviendrons sur ce point au paragraphe 1.8.2.

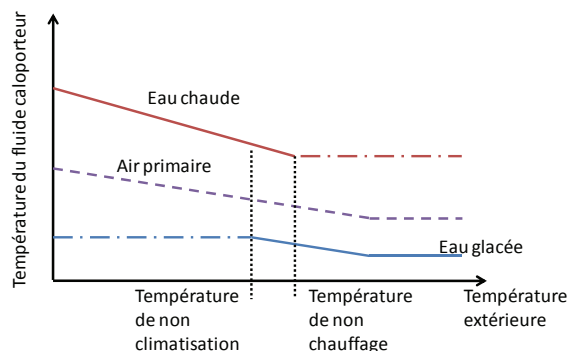


Figure 1-8 Exemple de loi d'air et d'eau pour un système 4 tubes

<sup>3</sup> Notons que la loi de la Figure 1-7 suppose un unique réseau pour la CTA et les unités terminales

## 1.4 Comprendre l'architecture locale d'un réseau de distribution d'eau

Nous rappelons que nous avons défini les constituants d'un réseau local comme ceux utilisés afin de **transférer l'énergie** d'un bout à l'autre du circuit d'eau indépendamment de l'usage de la chaleur ou du froid.

Nous proposons de décomposer cette architecture en deux réseaux de distribution :

- Le circuit primaire comprend un réseau d'eau et les évaporateurs des groupes de production. C'est la partie du réseau qui est dédiée à la production d'eau glacée.
- Le circuit secondaire comprend un réseau et les échangeurs utilisés pour l'émission. C'est la partie du réseau qui est dédiée à distribuer l'eau glacée en la répartissant entre les différentes zones thermiques.

Chacun de ces deux circuits peut être équipé d'un système de pompage. Nous distinguerons donc deux cas : un système de pompage unique pour l'ensemble du circuit et un système de pompage au niveau des circuits primaire et secondaire.

### 1.4.1 Architecture du réseau d'eau glacée à une pompe

Dans ce type d'architecture il n'y a pas de découplage hydraulique entre la production située dans le circuit primaire et l'utilisation située dans le circuit secondaire.

#### 1.4.1.1 Régulation terminale par vanne 3 voies

Le débit de la pompe est constant et une vanne trois voies permet de bipasser le fluide de la batterie dans une branche équipée d'une vanne de réglage. L'utilité de cette vanne est développée au paragraphe 1.7.3.1. Le schéma de ce type d'architecture est donné sur la Figure 1-9.

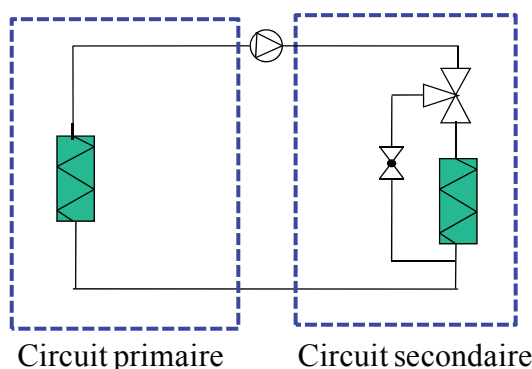


Figure 1-9 Montage vanne 3 voies

#### 1.4.1.2 Régulation terminale par vanne 2 voies

L'utilisation d'une vanne deux voies pour la régulation terminale implique une distribution d'eau à débit variable de la branche principale du circuit secondaire. Cette variation est obtenue par deux moyens technologiques :

- Soit le débit d'eau est maintenu constant au niveau du circuit primaire et un tuyau de retour commun permet de réguler ce débit. La vanne placée sur ce retour permet d'assurer cette régulation par pression différentielle constante. La Figure 1-10 représente ce type d'architecture.
- Soit par l'utilisation de pompes à débit variable, contrôlées au moyen d'un régulateur de vitesse et par la mesure de la pression différentielle (départ circuit/retour circuit), placées sur le circuit secondaire. La Figure 1-11 présente ce type d'architecture. Nous reviendrons sur les lois de contrôle de ce type d'installation au paragraphe 1.8.1.

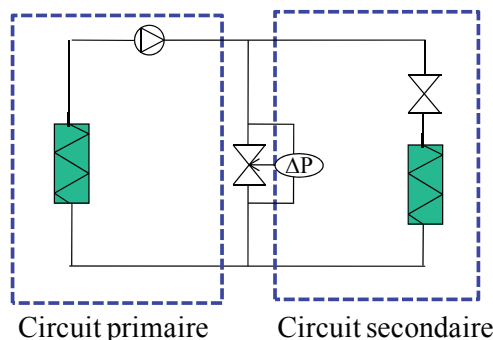


Figure 1-10 Montage vanne 2 voies par régulation d'une vanne 2 voies

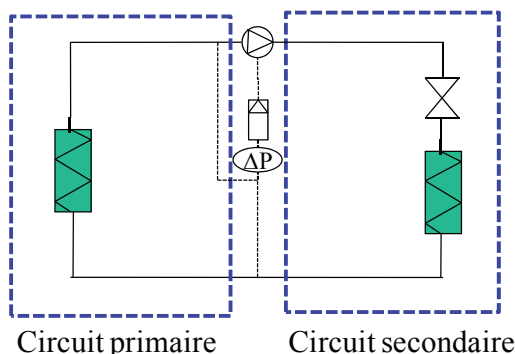


Figure 1-11 Montage vanne 2 voies par pompe à vitesse variable

#### 1.4.2 Architecture du réseau d'eau glacée à plusieurs pompes

Ce type d'architecture est envisagé dans des installations importantes. En effet, pour de telles applications, il n'est pas rare d'observer que le circuit secondaire se décompose en plusieurs sous circuits desservant des zones diverses du bâtiment. Ce type d'architecture permet alors de séparer hydrauliquement la distribution de l'eau et la production en fonction des charges spécifiques de chaque zone. Nous reviendrons sur la notion d'équilibrage au paragraphe 1.7.

Quelle que soit l'architecture d'un réseau d'eau glacée à plusieurs pompes, le système de pompage situé au niveau du circuit de distribution (circuit secondaire), peut être constitué de deux façons différentes :

- Un module de pompage situé à l'entrée du système de distribution
- Un module de pompage dédié à chaque zone du bâtiment. Ces pompes sont positionnées à l'entrée du réseau de chaque zone.

Différentes technologies existent afin d'assurer un découplage hydraulique de l'installation :

- Un tuyau de bypasse équipé d'une vanne deux voies motorisée est une première solution. [ASHRAEA07]. Ce bypasse dit bypasse lisse est constitué d'un tube ayant le même diamètre que les tuyauteries s'y raccordant.
- L'utilisation d'une bouteille de découplage (encore appelé bouteille casse pression) est une seconde solution. Celle-ci permet de découpler et de rendre hydrauliquement indépendant le circuit primaire et secondaire



## 1.5 Comprendre la régulation de l'émission

Au paragraphe 1.4, nous avons introduit les moyens technologiques permettant de faire varier la puissance transmise à l'air par le système d'émission. Afin de piloter l'ensemble des vannes de régulation de l'émission il est nécessaire d'expliciter les technologies utilisées. Celles-ci peuvent être spécifiques à l'architecture centrale d'un réseau.

### 1.5.1 Utilisation d'une bande morte

Quelle que soit l'architecture du réseau hydraulique, une **bande morte** est généralement utilisée pour **séparer** les consignes en mode chaud et en mode froid (Figure 1-12). Ce type de loi de régulation permet de piloter l'ouverture des vannes alimentant les batteries froides et les batteries chaudes.

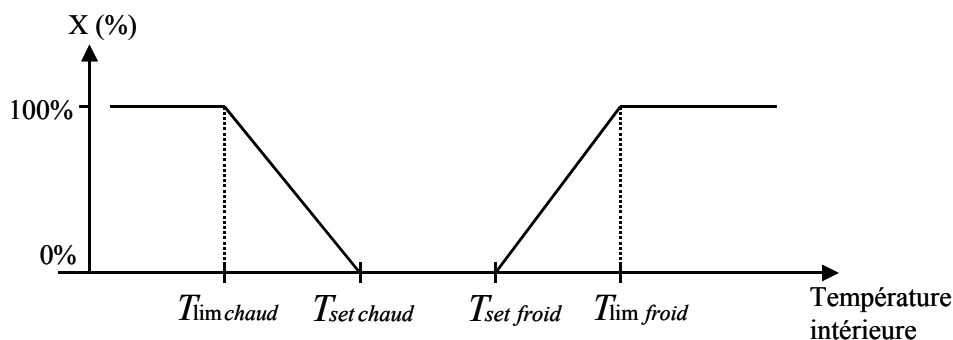


Figure 1-12 Ouverture des vannes d'eau chaude et d'eau froide par « bande morte »

### 1.5.2 Régulation locale pour une architecture deux tubes

Pour les unités terminales à deux tubes, le régulateur local doit agir différemment selon que la batterie est alimentée en eau chaude ou en eau glacée : le signe de la pente de sa caractéristique doit s'inverser entre le fonctionnement été et hiver. Le changement peut être télécommandé par un moyen de distribution d'ordres centralisés zone par zone. Ce changement de pente peut être également réalisé au moyen d'un contact électrique commandé par une sonde de contact. Cette sonde mesure la température d'eau qui alimente la batterie. Sur la Figure 1-13, nous avons représenté la sonde de contact placée en amont de la vanne trois voies. Le signal électrique est ensuite transmis à un régulateur qui compare cette information à une loi d'eau pour définir le mode d'utilisation et donc sélectionner la température de consigne de la pièce (été-hiver). Cette température de consigne est enfin comparée à l'information d'une sonde de température ambiante pour commander la mise en marche du ventilateur et l'ouverture de la vanne.

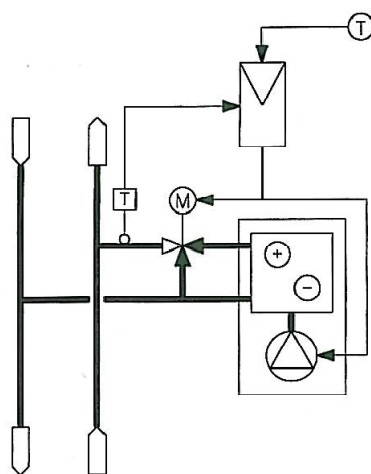


Figure 1-13 Changement de consigne pour un système deux tubes, extrait de [Cyssau95]

### 1.5.3 Régulation locale pour une architecture quatre tubes

Dans le cas d'un système quatre tubes, le traitement de l'air s'effectue à l'aide de deux batteries indépendantes (une chaude et une froide)<sup>4</sup>, un problème de régulation pourrait fournir du chaud et du froid au même moment. D'un point de vue technologique deux vannes trois voies ou deux vannes deux voies, travaillant en séquence, permettent d'alimenter les échangeurs.

La régulation terminale se fait à partir d'une sonde d'ambiance ou de reprise qui fournit une information au régulateur. Ce dernier agit en séquence sur les vannes d'eau chaude et d'eau froide (contrôle par bande morte).

Pour les deux batteries chaud et froid de la centrale, un séquenceur est utilisé pour fournir plusieurs signaux destinés aux différents organes d'alimentation. Par exemple, pour un système basique de ventilation, de chauffage et rafraîchissement, le séquenceur envoie un signal au servomoteur de la vanne d'eau chaud, et un à celui de la vanne d'eau froide, noté « Seq » à la figure 1-14. Cette séquence est la même que celle définie à la figure 1-12.

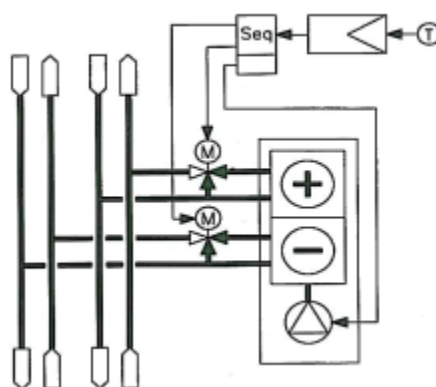


Figure 1-14 Technologie de contrôle local d'un système 4 tubes, extrait de [Cyssau95]

Notons également que pour les éjecto-convecteurs et ventilo-convecteurs, des registres peuvent être utilisés afin de bypasser les batteries. Une alimentation en chaud et en froid peut donc amener à chauffer et refroidir l'air dans la même pièce si les registres ne sont pas étanches.

<sup>4</sup> Notons que nous n'abordons pas les installations 2 tubes / 2 files. Dans ce cas la régulation locale s'effectue de manière analogue à celle d'un système quatre tubes.

## 1.6 Analyser un réseau de distribution d'eau dans un bâtiment

La complexité d'un bâtiment soumis à différents apports internes ou externes rend la mise en place d'une architecture de réseau spécifique nécessaire pour traiter les charges thermiques par zone et donc d'assurer le confort en tout point du bâtiment. Cette mise en place doit comprendre un organe de découplage hydraulique entre le circuit primaire et le circuit secondaire. Dans un but d'économie d'énergie il est envisageable de considérer l'ajout d'un système de contrôle de débit adapté aux charges thermiques du bâtiment. Nous exposons quatre types d'architecture dans les paragraphes suivants.

### 1.6.1 Système à débit constant au primaire et au secondaire

Une architecture à débit constant au niveau du primaire et du secondaire permet de maintenir une température d'entrée d'eau constante au niveau du circuit secondaire à pleine charge ou à charge partielle. Ce type d'architecture est représenté sur les deux schémas suivant pour un montage en vanne 3 voies (V3V) et un montage en vanne deux voies (V2V).

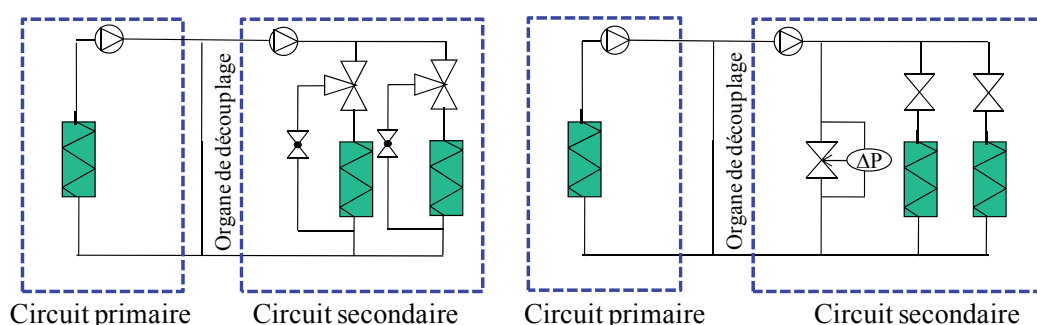


Figure 1-15 Architecture à débit constant

Dans un montage à V3V tout comme à V2V, le débit du circuit primaire et du circuit secondaire doivent être compatibles. C'est-à-dire qu'à pleine charge ou à charge partielle le débit du circuit primaire doit être légèrement supérieur à celui du secondaire pour assurer le transfert de l'énergie du primaire vers le secondaire. Nous reviendrons sur ce point au paragraphe 1.9.5.4.

### 1.6.2 Système de pompage à débit variable au secondaire

Pour un système de pompage à débit variable dans le circuit secondaire uniquement, des vannes deux voies doivent obligatoirement être installées afin d'assurer la régulation de la puissance échangée par les échangeurs (

Figure 1-16 et Figure 1-17). Nous n'évoquons ici que l'utilisation d'un variateur de fréquence afin de faire varier la vitesse de rotation de la pompe et donc son débit. En effet, il est possible de rencontrer un système de régulation pilotant une vanne deux voies placée en parallèle de la pompe (Figure 1-18). Cependant ce type de régulation n'est pas énergétiquement optimal et est donc à proscrire.

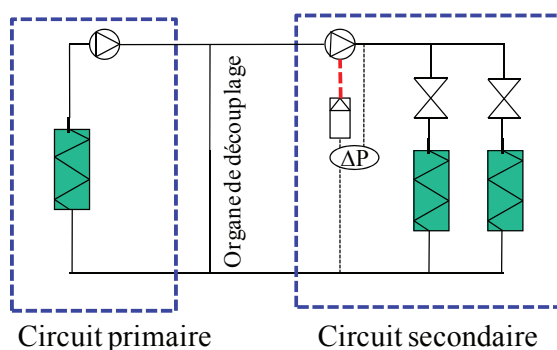


Figure 1-16 Architecture à débit variable au secondaire

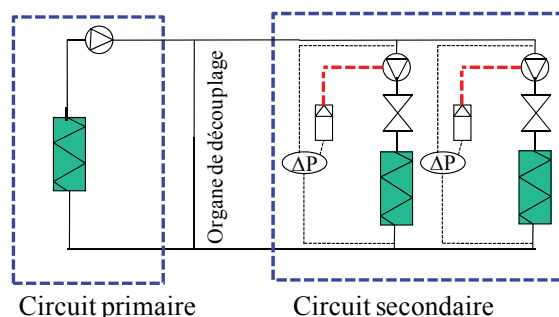


Figure 1-17 Architecture à débit variable au secondaire avec pompes dédiées

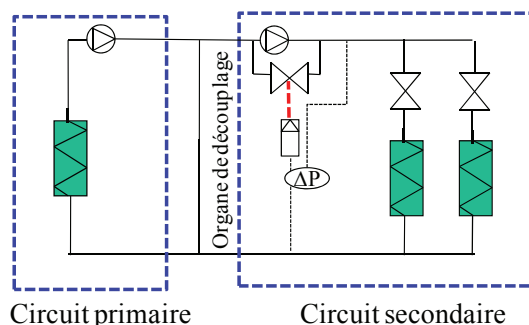


Figure 1-18 Architecture à proscrire

Notons que placer une vanne deux voies en parallèle d'une pompe permet d'adapter le débit. Nous reviendrons sur ce point au paragraphe 1.9.5.4.

### 1.6.3 Système à débit variable au primaire

Pour un système de pompage à débit variable dans le circuit primaire uniquement, il est nécessaire d'assurer un débit minimum au niveau du ou des groupes de production et donc d'assurer à la fois la stabilité de la régulation de ces équipements, mais également d'éviter tout problème de mélange dans l'organe de découplage. Pour la stabilité de la régulation du groupe on se référera au paragraphe 1.9.4.3.

La régulation terminale est assurée à l'aide de vannes deux voies et d'un tuyau de retour commun dont le débit est régulé afin de maintenir un différentiel de pression à ses bornes. Une régulation terminale par vanne trois voies est également envisageable.

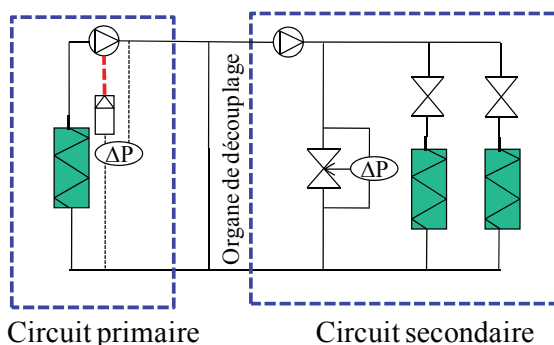


Figure 1-19 Architecture à débit variable au primaire

#### 1.6.4 Système à débit variable au primaire et au secondaire

Une architecture à système de pompage dédiée à chacune des zones est présentée sur la figure suivante. Cette architecture reprend l'architecture du circuit secondaire à débit variable et l'architecture du circuit primaire à débit variable.

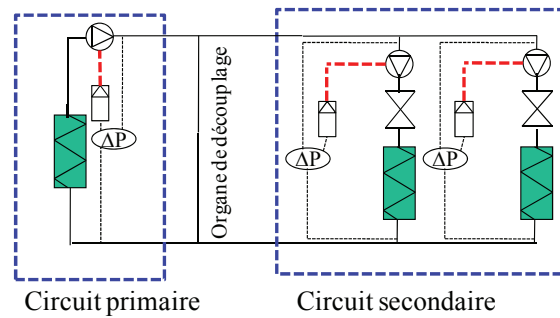


Figure 1-20 Architecture à débit variable au primaire et au secondaire

## 1.7 Comprendre l'installation du réseau de distribution

L'analyse des schémas typiques d'un réseau de distribution d'eau glacée montre l'existence de deux circuits plus ou moins élaborés : le circuit primaire et le circuit secondaire où sont respectivement localisés l'unité de production frigorifique et les échangeurs de chaleur. L'assemblage de ces deux circuits de distribution, via un organe de découplage, est installé afin de garantir le transfert de l'énergie entre la production et l'émission. Il est donc nécessaire d'examiner et de comprendre les moyens techniques permettant d'assurer ce transfert vers toutes les zones thermiques du bâtiment quelles que soient leurs conditions de fonctionnement.

### 1.7.1 Equilibrage du réseau et interférences hydrauliques

Les caractéristiques de transfert thermique des échangeurs varient fortement en fonction du débit. La conception de l'architecture d'un réseau et de sa régulation implique intrinsèquement que le débit nominal ne peut être respecté sans la mise en place d'un équilibrage adéquat. Par exemple, la mise en parallèle d'échangeurs dans un circuit d'eau induit généralement une variation de débit entre les différentes branches raccordées.

Mais le fonctionnement non nominal de l'installation par la régulation de débit accentue également la mauvaise répartition des débits.

Les deux phénomènes suivants doivent être distingués :

- La mauvaise répartition des débits en régime de fonctionnement nominal
- Des interférences hydrauliques pendant le fonctionnement de l'installation (en dehors du régime nominal)

Les définitions associées sont données dans le paragraphe suivant.

### 1.7.2 Définition

Selon [Fridmann09], « *une installation est **hydrauliquement équilibrée** lorsque tous les débits de branches sont égaux aux débits souhaités, c'est-à-dire aux débits calculés en régime nominal de fonctionnement, celui-ci étant le régime de fonctionnement pour lequel l'installation est dimensionnée* ». L'équilibrage du réseau ne peut donc être vérifié que lorsque toutes les vannes de régulation du circuit sont ouvertes à 100% et la pompe fonctionne à son régime maximal.

Partant de cette définition, il est alors possible de parler d'**interférences hydrauliques** « *lorsque le « réglage » d'un circuit dérivé modifie la répartition des pressions dans le circuit principal et donc des débits dans les autres circuits dérivés* ».

Dans cette définition, le « réglage » peut être entendu comme une action manuelle sur les organes de réglages mais également comme l'action continue des organes de régulation. Une interférence hydraulique pourra être alors détectée lors des opérations d'équilibrage ou pendant le fonctionnement de l'installation.

Compte tenu de ces définitions certains organes ont un rôle spécifique :

- Les régulateurs de pression différentielle (par la régulation de débit au moyen de pompes ou par bipasse) ainsi que les vannes de réglage placées en parallèle pour un montage en V3V, permettent de supprimer les interférences hydrauliques.
- Les autres vannes de réglage permettent quant à elles l'équilibrage du réseau.

Nous détaillons au paragraphe 1.9.5.1 le dimensionnement des vannes de réglage permettant l'équilibrage d'une branche du circuit d'eau.

### 1.7.3 Interférences hydrauliques et solutions adéquates

#### 1.7.3.1 Régulation de l'émission par vanne 3 voies

Un contrôle terminal de la puissance par vanne 3 voies requiert la mise en place d'une vanne de réglage supplémentaire, et ce pour en compenser la fermeture. Ainsi le bipasse de l'échangeur ne modifiera pas le débit des autres branches du circuit. La loi de perte de charge en fonction du débit de cette vanne devrait être identique à celle de l'échangeur bipassé.

La mise en place d'une vanne 2 voies en parallèle de l'échangeur permet de réaliser cette opération (voir Figure 1-21).

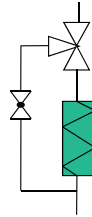


Figure 1-21 Régulation de l'émission par une vanne 3 voies

Cette vanne est sélectionnée conformément à la perte de charge de l'échangeur. La sélection d'un échangeur permet de connaître cette donnée (cf. Figure 1-28 et Tableau 1-1).

#### 1.7.3.2 Régulation terminale par vanne 2 voies

L'équilibrage des vannes 2 voies s'effectue directement par le tuyau de découplage (bipasse) entre le primaire et le secondaire ou par variation de débit de la pompe.

#### 1.7.4 Couplage hydraulique entre le réseau primaire et secondaire

Certaines règles sont à respecter pour assurer le transfert d'énergie entre le réseau primaire et le réseau secondaire lorsqu'une bouteille de découplage ou un bipasse sont utilisés.

Il existe deux régimes de fonctionnement pour la connexion hydraulique en fonction du débit du primaire et du secondaire :

- Un découplage hydraulique pour le régime de casse pression différentiel : dans ce cas, le débit du primaire est égal au débit du secondaire. Dans la pratique [Sala03] on admet que le débit du primaire peut être très légèrement supérieur à celui du secondaire. C'est-à-dire qu'il est communément admis que la compatibilité des débits est respectée lorsque  $Q_{primaire} = 1.05 Q_{secondaire}$
- Un régime de mélange : dans ce cas le débit du primaire est inférieur à celui du secondaire. Un débit existe donc dans l'organe de déconnexion. Ce mode de fonctionnement peut être utilisé afin d'établir une loi de température d'eau en fonction de la température extérieure. Mais ce régime est à proscrire dans tout autre cadre d'application. En effet, si ce régime de mélange n'est pas désiré, le transfert de la puissance entre le circuit primaire et le circuit secondaire n'est pas réalisé, il se produit un phénomène cumulatif : la température à l'entrée du réseau secondaire augmente, les vannes de régulation des émetteurs s'ouvrent, la température continue ensuite à augmenter, etcetera..., le confort des zones n'est alors pas respecté.

## 1.8 Exploiter les réseaux de distribution d'eau glacée

Dans les parties 1.4, 1.5, nous avons mis en évidence que l'exploitation d'un réseau et des émetteurs requiert :

- localement, une loi de régulation du débit d'eau
- centralement, une définition de la saison de chauffage et de climatisation, en particulier à l'aide d'une température extérieure pour un système deux tubes

Nous proposons d'examiner dans les paragraphes suivants, comment peuvent être définies les lois de régulation d'une pompe (paragraphe 1.8.1) et comment définir pratiquement la température d'inversion (paragraphe 1.8.2).

### 1.8.1 Lois de contrôle d'une pompe à vitesse variable

Il existe trois types de régulation classique pour assurer le contrôle de pompes à débit variable pour une régulation terminale à vanne 2 voies.

#### 1.8.1.1 Régulation de vitesse à pression différentielle constante

La vitesse de la pompe est contrôlée pour maintenir une pression différentielle constante. Le point B est obtenu pour un système à vitesse constante, le débit du bipasse entre primaire et secondaire est régulé par une vanne à pression différentielle. Notons que le point C n'appartient pas à la même courbe caractéristique du réseau, toutefois les débits des points C et B sont identiques pour assurer l'équilibrage hydraulique du système à vannes deux voies (Figure 1-22).

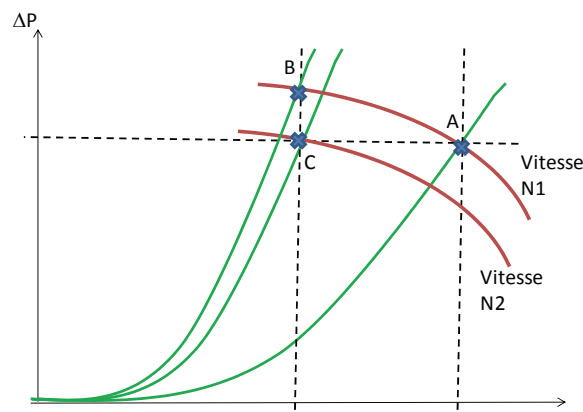


Figure 1-22 Régulation de vitesse à pression différentielle constante

#### 1.8.1.2 Régulation à pression différentielle variable, proportionnelle au débit

La fermeture d'une vanne entraîne une variation de pression. Cette variation est régulée proportionnellement au débit. Il est donc nécessaire d'évaluer le débit ou de connaître la position de fermeture des vannes pour réguler ce type de contrôle (Figure 1-23).



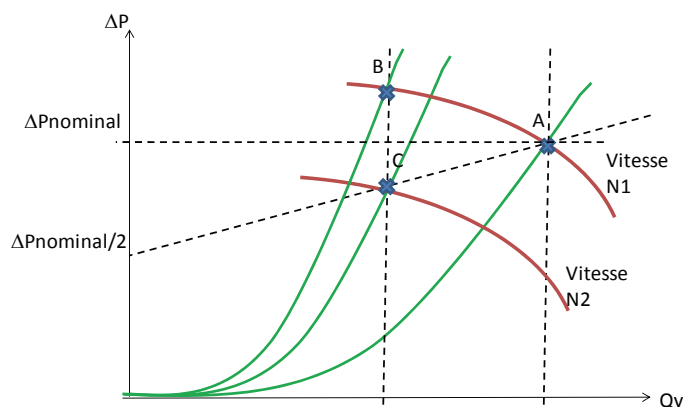


Figure 1-23 Régulation à pression différentielle proportionnelle au débit

### 1.8.1.3 Régulation selon les besoins

La vitesse de la pompe est réglée de manière à correspondre à la courbe caractéristique du réseau en régime nominal.

La fermeture des vannes doit être connue afin de déterminer le débit au point C et ainsi réduire de façon adéquate la vitesse (Figure 1-24).

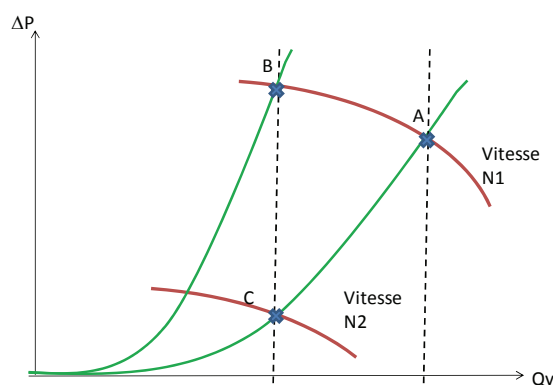


Figure 1-24 Régulation selon les besoins

### 1.8.2 Consigne d'exploitation centrale: mode été-hiver

Le mode été et le mode hiver doivent être définis pour aider l'exploitant lors du changement de consigne ou plus simplement pour définir une saison de chauffage et de rafraîchissement.

Mais, que ce soit pour un système quatre tubes ou deux tubes, le changement de mode été / hiver permet de définir une saison de « non production », celle-ci limite la consommation des auxiliaires et détermine la veille des équipements de production.

Ainsi, si l'exploitant commande le mode été/hiver manuellement, il devient important de le conseiller dans le choix de la date, ou de l'instant à partir duquel il doit effectuer cette opération. De plus, l'inspecteur devra vérifier le système de régulation et pourra conseiller la mise en place d'une sonde de température extérieure pour construire des lois d'eau et d'air correspondant aux charges thermiques du bâtiment.

La détermination des modes de fonctionnement doit donc prendre en compte une consigne applicable sur le terrain mais également minimiser la consommation énergétique et assurer le confort des occupants ; différentes définitions de ces périodes été-hiver sont explorées dans les paragraphes suivants.

### 1.8.2.1 Définitions existantes de la température d'inversion et de la température de non climatisation

Des définitions différentes peuvent être données par les fabricants et d'autre part par les exploitants.

Les fabricants [CIAT1] définissent le mode été/hiver à l'aide de la règle suivante : le groupe produira du froid dès que la température intérieure sera supérieure à la consigne de température. La production de chaud est contrôlée de manière antagoniste par rapport à celle de froid. Cette définition a pour objet l'exploitation d'un système de climatisation de type split-system. Comme celui-ci, d'autres systèmes de climatisation existants sont implantés et contrôlés localement grâce à une sonde de température introduite dans la zone climatisée. En pratique cette définition des fabricants n'est donc pas opératoire à elle seule pour des systèmes plus complexes. Il faut alors la compléter par la description des systèmes pour savoir comment sont gérés les différentes consignes et les différents équipements.

Nous proposons donc d'examiner si l'application d'une consigne pour définir le mode chaud et le mode froid est envisageable pour les systèmes utilisant l'air extérieur comme air primaire c'est à dire par rapport aux systèmes à eau glacée aux paragraphes 1.1.2 et 1.1.3.

Pour un système à deux tubes, le passage du mode été au mode hiver correspond à la **température d'inversion** de la zone considérée. Cette température assure le bon fonctionnement de ce type de système. Le changement étant généralement effectué manuellement par l'exploitant deux fois par an. Ainsi, un inconfort des occupants peut apparaître dans certaines zones du bâtiment et ce en particulier en période d'intersaison. Ainsi il existe une **température de non-climatisation** correspondant à une certaine température extérieure en dessous de laquelle le refroidissement n'est pas nécessaire [ASHRAES04].

Pour un système quatre tubes, le mode chaud et le mode froid peuvent apparaître selon la charge thermique de chaque zone. Ainsi, la production de chaud ou celle de froid peuvent être assurées toute l'année. Pour un système quatre tubes parfaitement conçu, le confort doit être respecté toute l'année. Dans ce cas la détermination de la température de non climatisation permettrait d'éteindre les équipements de production et de distribution de froid.

### 1.8.2.2 Détermination de la température d'inversion: méthode Carrier

Une zone du bâtiment à conditionner est soumise à différents flux de chaleur :

$$\begin{cases} Q_{zone} = Q_{env} + Q_{sens} + Q_{latent} + Q_{vent} + Q_{solaire} + Q_{inertie} + Q_{inf} \\ Q_{env} = KS (T_{ext} - T_{in}) \\ Q_{vent} = \dot{m} C_{p\ air} (T_{ext} - T_{in}) \end{cases}$$

Avec  $Q_{zone}$  le flux de chaleur reçu par la zone thermique,  $Q_{env}$  le flux de chaleur traversant l'enveloppe (W),  $Q_{sens}$  la chaleur sensible due aux apports internes (W),  $Q_{latent}$  la chaleur latente due à l'évaporation (W),  $Q_{vent}$  la chaleur provenant du système de ventilation (W),  $Q_{solaire}$  les apports solaires (W),  $Q_{inertie}$  la chaleur libérée par la structure capacitive du bâtiment (W),  $Q_{inf}$  la chaleur due aux infiltrations d'air de l'enveloppe (W).

Si l'on néglige le flux de chaleur provenant de l'inertie de la zone, les infiltrations et la chaleur latente devant les autres flux, le flux de chaleur de la zone s'écrit :

$$Q_{zone} = Q_{env} + Q_{sens} + Q_{vent} + Q_{solaire}$$

La température de base ou température d'inversion correspond à la température extérieure pour laquelle la zone est en équilibre thermique avec l'extérieur. Donc :

$$Q_{zone} = 0$$

D'où :

$$Q_{env} + Q_{sens} + Q_{vent} + Q_{solaire} = 0$$

En remplaçant l'expression du flux de chaleur du système de ventilation et des gains de chaleur par conductivité de l'enveloppe, l'équation précédente s'écrit :

$$KS (T_b - T_{in}) + \dot{m} C_{p \text{ air}} (T_S - T_{in}) + Q_{sens} + Q_{solaire} = 0$$

Donc

$$T_b = T_{in} - \frac{\dot{m} C_{p \text{ air}} (T_S - T_{in}) + Q_{sens} + Q_{solaire}}{KS}$$

Nous avons redémontré la formule de Carrier proposée en 1965 [ASHRAES04].

Cependant ce calcul est un calcul statique. Il peut être résolu en supposant certaines conditions météorologiques prédéterminées. Ainsi, une unique date peut donc être définie pour effectuer le passage des modes été-hiver.

Toutefois, cette résolution de calcul ne permet pas de prendre en compte le caractère aléatoire des conditions météorologiques. Le confort des occupants peut ainsi être plus ou moins altéré. Par exemple si l'exploitant vient effectuer le passage du mode hiver au mode été « trop tôt » dans la saison suite à une vague de douceur, le confort des occupants peut être altéré fortement si une vague de froid survient.

#### 1.8.2.3 Définition des modes été / hiver selon un calcul normatif japonais

[NORMJAP06] présente des méthodes normatives pour déterminer les charges de chauffage et de refroidissement dans le but d'effectuer le calcul de consommation et de la performance saisonnière des climatiseurs air / air. Cette norme définit les saisons de rafraîchissement et de chauffage à partir de la température extérieure en moyenne journalière. Ces définitions pourraient être utilisées et adaptées pour générer des lois de contrôle pour déterminer la température d'inversion d'un système deux tubes. Comme nous le verrons dans les paragraphes suivants, ce calcul normatif ne s'applique pas pour un bâtiment particulier.

La saison de refroidissement commence le troisième jour non consécutif où la température moyenne journalière extérieure dépasse les températures limites suivantes :

- Pour un commerce (autonome) : 20 °C
- Pour un commerce (locataire) : 18 °C
- Pour des bureaux : 16 °C

La saison finit le troisième jour non consécutif en dessous de la température limite.

Nous avons représenté schématiquement cette procédure à la figure suivante.

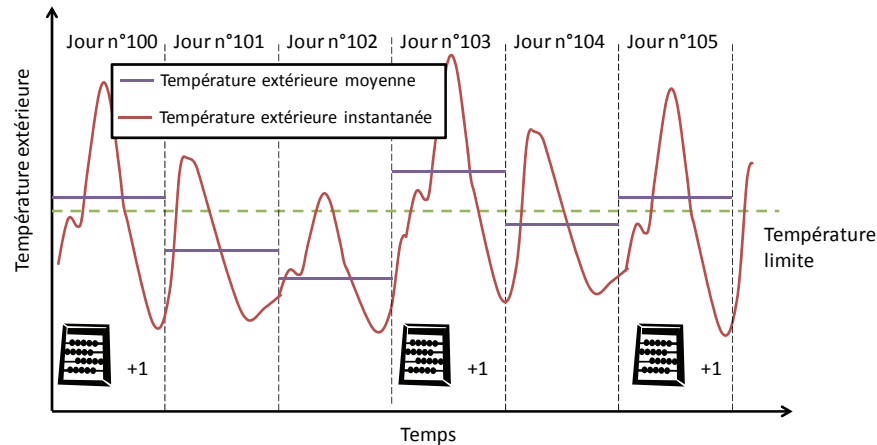


Figure 1-25 Représentation schématique pour la mise en marche de la climatisation selon [NORMJAP06]

D'une manière analogue, la saison de chauffage commence le troisième jour, non consécutif, où la température moyenne journalière extérieure tombe sous les limites de températures suivantes :

- Pour un commerce (autonome) : 12 °C
- Pour un commerce (locataire) : 10 °C
- Pour des bureaux : 8 °C

La saison finit le troisième jour non consécutif en dessous de la température limite.

#### 1.8.2.4 Définition des modes été/hiver selon le calcul normatif français

La réglementation thermique française [RT2005], définit la période de chauffe et de froid au niveau du bâtiment en évaluant les charges thermiques de froid et de chaud de chaque groupe. Le calcul est basé sur la comparaison de la moyenne glissante sur 4 semaines des charges thermiques de chaud et de froid avec une valeur limite de 1W/m<sup>2</sup>.

La période de chauffe s'arrête quand la moyenne glissante des charges thermiques de chaud devient inférieure à la valeur limite et redémarre quand elle devient supérieure.

La période de refroidissement démarre quand la moyenne glissante des charges thermiques de froid devient supérieure à la valeur limite et s'arrête quand elle devient inférieure.

L'usage de cette démarche est difficilement envisageable pour un exploitant.

## 1.9 De la charge thermique au dimensionnement des équipements

Dans les parties précédentes, nous avons exploré comment était conçue l'architecture et comment étaient exploités les réseaux d'eau glacée d'un bâtiment. Nous proposons d'analyser, dans cette partie, le second travail réalisé pour la conception du système de traitement d'air : le dimensionnement des installations.

La première étape de ce travail est de réaliser une estimation de la charge thermique en froid comme en chaud qui est nécessaire pour assurer une température intérieure acceptable pour les occupants.

L'estimation de la charge doit s'effectuer en deux étapes. Le concepteur doit examiner la charge thermique localement pour chacune des zones et d'une façon globale à l'échelle du bâtiment. Au niveau local, ce calcul permet de sélectionner les échangeurs en adéquation avec la charge ; au niveau central il permet de sélectionner le groupe de production.

Le choix des échangeurs s'effectue conformément à la charge locale du bâtiment (température de soufflage, température intérieure, exposition...) et du régime de température de fonctionnement du réseau et ce pour chacune des zones thermiques.

### 1.9.1 Détermination de la charge maximale d'une zone

Il existe trois types de méthode pour évaluer la charge qui peuvent être utilisées par les praticiens lors de la phase de conception :

- Les méthodes basées sur l'expérience du concepteur
- Les méthodes statiques
- Les méthodes dynamiques

Nous développons plus en détail ces trois méthodes d'évaluation dans le chapitre 4 partie 4.1. Nous retiendrons que chacune de ces méthodes admet un degré de simplicité d'utilisation variable.

### 1.9.2 Facteurs physiques impactant la charge maximale d'une zone

Nous avons répertorié, de façon non exhaustive, les facteurs modifiant la charge thermique maximale d'une zone :

- Les caractéristiques de l'enveloppe (conductivité, taux d'infiltration, ponts thermiques,...)
- La localisation du bâtiment dans un climat particulier
- Les charges internes
- Les spécificités du système (taux d'air neuf, récupération de chaleur,...)

### 1.9.3 Sélection des émetteurs de chaleur

La puissance thermique des émetteurs installés dans une zone doit être égale à la chaleur maximale à évacuer de cette zone. Mais un coefficient de sécurité peut majorer cette valeur pour prendre en compte :

- Un biais lié à la méthode d'évaluation de la charge
- Les pertes du réseau
- Les démarrages en conditions extrêmes
- Les conditions extérieures extrêmes et non pas les conditions extérieures de base

Le bureau d'étude se voit ainsi couvert car la fourniture de la charge thermique est obligatoirement assurée.

### 1.9.3.1 Détermination du débit d'eau nécessaire à un échangeur

Le débit d'eau d'un échangeur est déterminé à l'aide de la relation suivante

$$\dot{m}_{eg} = \frac{P_{TU \text{ froid } n}}{C_{pe} \Delta T_{pegn}}$$

Ainsi, le débit d'eau est directement obtenu après sélection de l'échangeur et en ayant fixé un différentiel de température à ses bornes, par exemple 5°C.

### 1.9.3.2 Dimensionnement d'une CTA

Une des configurations classiques de CTA est donnée dans la figure suivante.

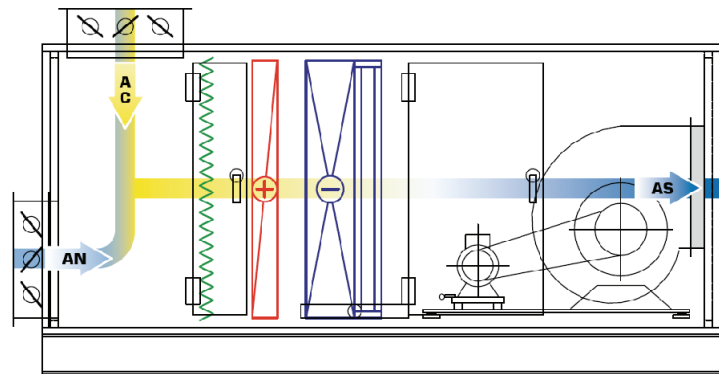


Figure 1-26 Exemple schématique de CTA, extrait de [Wesper10]

De l'air neuf (flèche AN) est introduit à l'aide d'un registre et est mélangé à de l'air extrait du local et recyclé (flèche AC). Ce mélange est filtré (élément vert) puis chauffé à l'aide d'une batterie chaude (élément rouge) ou refroidi à l'aide d'une batterie froide (élément bleu). L'air traité est alors introduit dans le local flèche AS). Un ventilateur permet la circulation de l'air dans la CTA.

Le débit d'air de soufflage d'une CTA peut être calculé à partir de la charge sensible [BouteloupS98] à l'aide de l'équation suivante :

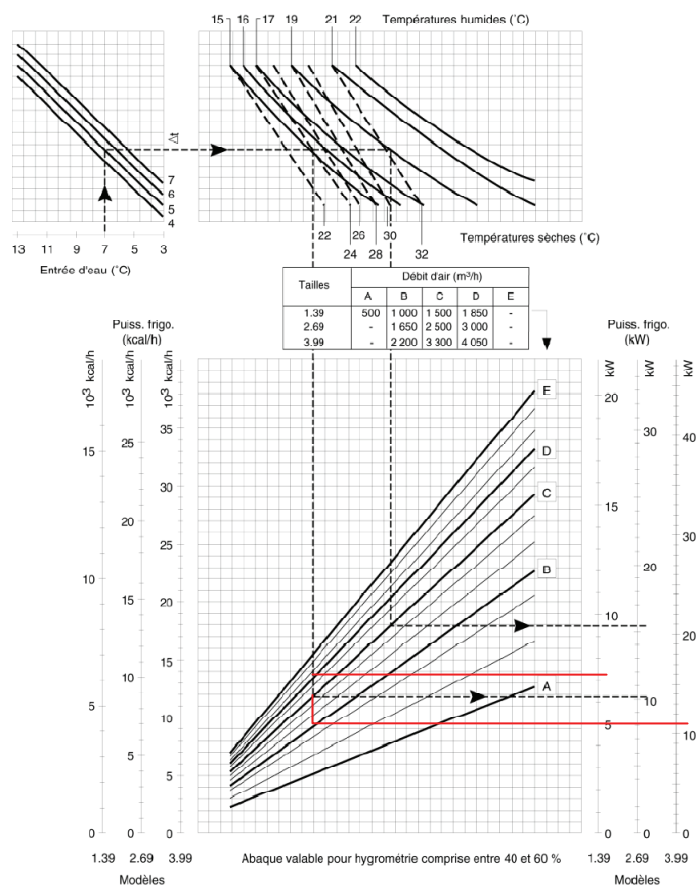
$$q_{CTA} = \frac{Charge_s}{C_{p \text{ air}} \Delta T_s}$$

Avec  $\Delta T_s = T_{consigne} - T_{soufflage}$

Afin d'assurer une température raisonnable de soufflage dans la pièce et ne pas générer l'inconfort des occupants, une température minimum de soufflage doit être fixée. Elle peut être par exemple de 16°C [BouteloupS98]

Le nombre d'occupants d'une zone thermique conditionne le débit d'air neuf à introduire afin de respecter le code du travail [Codetravail]. En effet, un minimum d'air neuf est fixé dans cet arrêté à une valeur de 25 m<sup>3</sup>/h par occupant.

En supposant des conditions de dimensionnement pour les caractéristiques de l'air à l'entrée de la batterie (une température sèche et une température humide), la puissance thermique de la batterie et la température d'entrée d'eau, des abaques peuvent être utilisés pour sélectionner le modèle adéquat. Un exemple d'abaque est donné à la Figure 1-27.



#### Exemples de sélection

Données : Puissance d'un 2.69 à 2500 m³/h à 24 °C sec, 19 °C humide au régime 7/12 °C.

- ✓ Tracer une verticale de la température d'entrée d'eau (7°C) jusqu'à la courbe  $\Delta t$  5 °C.
- ✓ Tracer une horizontale à partir de ce point, puis 2 verticales à partir des intersections avec les courbes BS 24 °C et BH 19 °C, jusqu'à la courbe C correspondant au débit d'air (2500 m³/h).
- ✓ Lire en regard la puissance totale (15420 W) et la puissance sensible (10285 W).
- ✓ Calculer le débit d'eau :  $15420 \times 0.86 / 1000 / (12 - 7) = 2.65 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Figure 1-27 Abaques de sélection d'un échangeur, extrait de [Airwell]

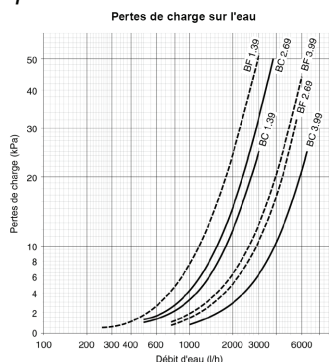


Figure 1-28 Abaque des pertes de charge de l'évaporateur, extrait de [Airwell]

Par exemple, nous recherchons une centrale de traitement d'air avec registre de mélange, nous supposons les données suivantes disponibles qui sont calculées pour un registre de mélange complètement ouvert :

- Débit volumique d'air minimal à l'entrée de la batterie : 1800 m³/h
- Température d'entrée d'eau / différentiel de température : 7°C / 5°C
- Température sèche / humide de l'air à l'entrée de la batterie : 24°C / 19°C
- Puissance thermique sensible requise : 9 kW



D'après l'information sur le débit minimal d'air, le concepteur a donc le choix entre le modèle 3.99 à 2200 m<sup>3</sup>/h, le modèle 2.39 à 2500 m<sup>3</sup>/h et le modèle 1.89 à 1850 m<sup>3</sup>/h. Sur les abaques de la figure 1-27, nous relevons les informations suivantes :

- Pour 2200 m<sup>3</sup>/h la puissance frigorifique est d'environ 11kW
- Pour 2500 m<sup>3</sup>/h la puissance frigorifique est d'environ 10kW
- Pour 1850 m<sup>3</sup>/h la puissance frigorifique est d'environ 7kW

Comme la puissance thermique sensible est de 10.5 kW, les modèles 3.99 et 2.39 peuvent être utilisés. Il est alors possible d'estimer la perte de charge de l'échangeur à l'aide de la Figure 1-28, laquelle sera utilisée pour réaliser le dimensionnement du réseau.

Afin de réduire le coût d'exploitation du système de ventilation, on préférera le modèle 3.99. D'un autre côté pour minimiser la consommation du système de pompage, on préférera le modèle 2.39. Bien entendu d'autres externalités comme l'encombrement ou le prix d'achat peuvent influencer le concepteur dans sa sélection.

Une méthode plus simple de sélection peut être utilisée par le concepteur. Des coefficients correcteurs peuvent être appliqués sur la puissance nominale pour prendre en compte l'effet de la vitesse d'air et du régime de température d'eau en mode chaud comme en mode froid. Les tableaux ci-dessous regroupent un exemple de ce type d'information.

Emissions frigorifiques					Cooling capacities				
• Conditions :					• Conditions				
– Eau froide : 6 / 11 °C.					– Cold water : 6 / 11 °C.				
– Température entrée air : 20 °C BH, 26 à 32 °C BS.					– Air inlet temp. : 20 °C WB, 26 to 32 °C DB.				
– Vitesse de l'air : 3 m / s.					– Air velocity : 3 m / s.				
Centrales AHU n°	2 rangs 2 rows		3 rangs 3 rows		4 rangs 4 rows		6 rangs 6 rows		
	kW	Contenance en l. Water content in l.	kW	Contenance en l. Water content in l.	kW	Contenance en l. Water content in l.	kW	Contenance en l. Water content in l.	
25	6,7	1,5	8,9	2,0	10,1	2,9	14,0	6,2	
50	13,5	3,8	16,4	4,8	20,2	5,9	31,5	12,5	
75	18,2	4,7	31,0	6,1	34,7	13,2	50,0	18,2	
100	28,2	5,5	41,9	7,4	51,3	16,1	68,7	22,5	
150	51,8	12,4	63,8	19,3	76,9	24,1	94,3	46,5	
200	69,0	19,2	83,8	25,7	102,6	38,2	125,9	67,0	
250	74,2	28,2	110,0	30,0	134,7	44,0	171,5	78,0	
300	99,2	31,1	113,3	40,5	166,3	50,0	211,4	89,3	

Coefficients correcteurs					Correction factors				
• K1 : en fonction de la vitesse de l'air en m / s					• K1 : depending on the air velocity in m / s				
Vitesse de l'air Air velocity	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00	3,25	3,50	4,00	
Coefficient Factor K1	0,77	0,83	0,89	0,945	1,00	1,05	1,1	1,19	

Figure 1-29 Exemple de données techniques simplifiées, extrait de [CIAT2]

Le calcul de ces coefficients peut être effectué à l'aide de la modélisation d'un échangeur de chaleur. Cette modélisation est décrite au chapitre 4 paragraphe 5.7.

### 1.9.3.3 Sélection d'une unité terminale de type ventilo-convecteur

Un ventilo-convecteur est sélectionné à l'aide d'un catalogue constructeur. Celui-ci indique la puissance maximale transférable à l'air, le débit d'eau ainsi que la perte de charge de l'équipement pour des conditions de température d'entrée/sortie d'eau et de température ambiante fixées par le fabricant. Ces données peuvent être normalisées et certifiées [Eurovent], dans le tableau 1-1 ces données sont notées (E).



Mod.		FCX 17	FCX 22
Puissance thermique	W (max.)	2490	3400
	W (moy.)	2070	2700
	W (min.)	1610	1915
Puissance thermique* (eau entrée 50°C)	W (E)	1360	2100
Puissance résistance électrique	W	700	950
Débit d'eau	l/h	214	292
Pertes de charge eau	kPa (E)	2,8	6,3
Puissance frigorifique totale	W (max.) (E)	1000	1500
	W (moy.)	890	1330
	W (min.)	720	1055
Puissance frigorifique sensible	W (max.) (E)	830	1240
	W (moy.)	710	1055
	W (min.)	540	755
Débit d'eau	l/h	172	258
Pertes de charge eau	kPa (E)	2,6	5,8

Tableau 1-1 Exemple extrait d'un catalogue constructeur

#### 1.9.4 Choix d'une machine de production

##### 1.9.4.1 Sélection de la puissance thermique du groupe de production

Comme la charge thermique des différentes zones du bâtiment n'est pas simultanée, il n'est pas rare que les calculs de dimensionnement amènent le concepteur à aboutir à un surdimensionnement des échangeurs par rapport à la production. Un coefficient de foisonnement (F) peut ainsi être introduit comme dans [CFPavril09] à l'aide de la formule suivante.

$$F = \frac{P_{frigo}}{\sum P_{échangeur}}$$

Dans [CFPavril09] un ordre de grandeur de grandeur pour ce coefficient :

- $F \sim [0.80 ; 0.90]$  pour les bâtiments de surface inférieure à 1000 m<sup>2</sup>
- $F \sim [0.60 ; 0.80]$  pour les bâtiments de surface comprise entre 1000 à 15000 m<sup>2</sup>
- $F \sim [0.50 ; 0.60]$  pour les bâtiments de surface supérieure à 15000 m<sup>2</sup>

##### 1.9.4.2 Dimensionnement de la machine

Le débit d'eau traversant la machine de production est calculé classiquement en imposant un différentiel de température à ses bornes et en utilisant les performances tabulées par le constructeur. Un exemple de ce type d'information est donné au tableau 1-2.

% éthylène glycol	Temp. sortie eau glacée	Température ambiante extérieure															
		25°C				30°C				35°C				40°C			
		Puiss. (kW)	P.Abs. (kW)	HP (bar)	BP (bar)	Puiss. (kW)	P.Abs. (kW)	HP (bar)	BP (bar)	Puiss. (kW)	P.Abs. (kW)	HP (bar)	BP (bar)	Puiss. (kW)	P.Abs. (kW)	HP (bar)	BP (bar)
37%	-12°C	41,4	17,9	13,2	1,9	39,3	19,9	15,2	1,9	37,2	22,3	17,4	1,9	35,0	25,1	19,1	1,9
33%	-8°C	49,1	18,4	13,7	2,3	46,7	20,5	15,7	2,4	44,2	23,0	17,9	2,4	41,5	25,8	20,1	2,4
27%	-4°C	57,6	19,1	14,2	2,8	54,8	21,2	16,2	2,8	51,9	23,8	18,5	2,9	48,8	26,7	21,1	2,9
20%	0°C	66,7	19,7	14,8	3,4	63,6	22,0	16,9	3,4	60,2	24,6	19,1	3,4	56,7	27,6	22,1	3,4
10%	4°C	76,6	20,5	15,4	3,9	73,0	22,8	17,5	3,9	69,2	25,5	19,9	4,0	65,1	28,6	22,9	4,0
0%	5°C	79,4	20,7	15,6	4,1	75,7	23,1	17,7	4,1	71,7	25,8	20,1	4,1	67,5	28,8	22,9	4,1
0%	6°C	81,8	20,9	15,8	4,2	78,0	23,3	17,9	4,3	73,9	26,0	20,2	4,3	69,6	29,1	22,9	4,3
0%	7°C	84,3	21,1	16,0	4,4	80,4	23,5	18,1	4,4	76,2	26,2	20,4	4,4	71,7	29,3	23,1	4,4

Tableau 1-2 Puissance frigorifique tabulée d'un groupe de production d'eau glacée [CIAT3]

On lit par exemple pour une température extérieure de 30°C, une température de sortie de groupe à 7°C et en absence d'éthylène glycol la puissance frigorifique fournie par le groupe qui est de 80.4kW, la puissance électrique consommée est de 23.5kW.

### 1.9.4.3 Contraintes techniques de sélection d'un GPEG

Les fabricants de groupes de production d'eau glacée (GPEG) fournissent un débit d'eau glacée minimum utilisable (cf. Tableau 1-3) et ajoutent également une limite sur la fréquence de la variation de débit, par exemple une variation de débit de 2% à 30% par minute. Ces informations doivent permettre d'assurer la stabilité du contrôle du GPEG et par exemple éviter un cyclage trop rapide. Notons qu'un débit maximum est également fourni par les constructeurs pour anticiper un problème d'érosion.

ITEM			MINIMUM		MAXIMUM		NOMINAL	
Cooler Leaving Water Temperature*			40 F (4.4 C)		60 F (15 C)		—	
Cooler Entering Water Temperature†			45 F (7.2 C)		70 F (21.1 C)		—	
30XA UNIT SIZE	Cooler	Number of Passes	Minimum Flow Rate		Maximum Flow Rate		Nominal Flow Rate	
			(gpm)	(L/s)	(gpm)	(L/s)	(gpm)	(L/s)
080	Standard	2	95	6.0	379	23.9	180.4	11.4
	Plus one pass	3	43	2.7	192	12.1		
	Minus one pass	1	196	12.4	782	49.3		
090	Standard	2	101	6.4	403	25.4	201.9	12.7
	Plus one pass	3	43	2.7	200	12.6		
	Minus one pass	1	229	14.4	917	57.9		

Tableau 1-3 Tableau de données constructeur GPEG [Carrier]

#### Variable cooler flow rates

Variable rates may be applied to a standard chiller. The unit will, however, attempt to maintain a constant leaving chilled water temperature. In such cases minimum flow must be in excess of minimum flow given in the Minimum and Maximum Cooler Fluid Flow Rates table, and minimum loop water volume must be in excess of 3 gallons per ton (3.2 l/kw). Flow rate must change in steps of less than 10% per minute. Apply a minimum of 6 gal. per ton (6.5 l/kw) water loop volume if flow rate changes more rapidly.

Figure 1-30 Exemple de recommandation constructeur pour l'utilisation d'un débit variable [Carrier]

### 1.9.4.4 Cohérence du groupe et des équipements de transfert de chaleur

La cohérence entre la production et les émetteurs devrait être vérifiée à l'aide des débits nominaux des différents équipements.

### 1.9.5 Conception : sélection des composants d'un réseau de distribution d'eau

Le dimensionnement du réseau d'eau s'effectue après la sélection des équipements de production et des moyens de transferts de chaleur. Celui-ci s'effectue en plusieurs étapes :

- Par la sélection de vannes pour la régulation terminale
- Par le dimensionnement de la tuyauterie
- Par la sélection d'une pompe
- Par la sélection de vannes d'équilibrage

#### 1.9.5.1 Sélection d'une vanne de régulation

Comme cité dans les paragraphes précédents, il existe deux catégories de vannes, des vannes deux voies et des vannes trois voies. Dans chacune de ces catégories, il existe différentes solutions technologiques, elles sont les suivantes : ouverture rapide, linéaire, égale pourcentage. Une vanne égale pourcentage permet de limiter ou supprimer la non linéarité du transfert de chaleur en fonction du débit et ainsi d'assurer un contrôle linéaire de l'échange.

Une vanne se caractérise techniquement par 2 grandeurs, le coefficient de vanne et l'autorité.

#### 1.9.5.1.1 Coefficient de vanne

Le coefficient de vanne  $K_v$  représente la capacité hydraulique d'une vanne. Il représente physiquement le débit volumique d'eau ( $Q_v$  en  $m^3/h$ ) qui traverse la vanne lorsqu'elle supporte une pression différentielle de 1 bar. Ainsi,  $K_v = \frac{Q_v}{\sqrt{J_v/\rho}}$

Avec  $\rho$  en  $kg/dm^3$  et  $J_v$  la perte de charge créée par la vanne (en bar). Le  $K_{vs}$  représente le  $K_v$  de la vanne grande ouverte.

#### 1.9.5.1.2 Autorité d'une vanne

L'aptitude d'une vanne à réguler le débit dans un circuit donné est représentée par son autorité  $a$ .

$$a = \frac{J_v}{J_r + J_v}$$

Avec  $J_r$  la perte de charge du réseau dont la vanne peut modifier le débit, cette perte de charge étant calculée à partir du débit maximal. Compte tenu que la vanne jouxte théoriquement l'échangeur de chaleur, c'est-à-dire dans le cas d'une régulation terminale par variation de débit dans l'échangeur, cette perte de charge est approximativement comme suit :

$$J_r \approx \Delta P_{\text{échangeur}}$$

Si l'autorité est faible, une fermeture ample de la vanne entraîne une faible réduction de débit. Dans ce cas, la stabilité de la régulation de la vanne est difficile à obtenir, la progressivité du réglage est de mauvaise qualité. Un effet de pompage peut alors apparaître, c'est-à-dire un phénomène d'ouvertures et de fermetures excessives cycliques, réduisant alors la durée de vie de la vanne. Au contraire, si l'autorité est élevée, une trop petite fermeture de la vanne entraîne une brutale chute de débit, la vanne admet alors une perte de charge très élevée, la vanne fonctionne alors en « tout ou rien ».

Pour assurer une régulation correcte de la vanne, son autorité doit être proche de 0.5. Certains ouvrages proposent les plages de valeurs suivantes :

$$0.33 < a < 0.66 \text{ [Memotech96]}$$

$$a \geq 0.5 \Leftrightarrow J_v \geq J_r \text{ [BouteloupD98]}$$

#### 1.9.5.2 Dimensionnement du réseau

Le réseau de distribution est sélectionné à l'aide d'abaques. Ceux-ci permettent d'établir la perte de charge linéique de tubes de rugosité et ce en fonction du débit. Le diamètre de la tuyauterie peut alors être sélectionné.

Traditionnellement, on choisit une perte de charge linéique  $j$  de 15mm/m.

D'un point de vue pratique  $10 < j < 20 \text{ mm/m}$  [BouteloupD98].

La perte de charge régulière  $J$  d'une conduite s'écrit comme suit :

$$J = j \cdot L \text{ avec } L \text{ la longueur de la conduite}$$

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot J$$

Pour la branche d'un circuit fermé, la somme des pertes de charge singulières (coudes, changement de section,...), des pertes de charge dues aux équipements (vannes,

batteries,...) et des pertes de charge régulières constituent la perte de charge totale d'une branche du réseau.

#### 1.9.5.3 Equilibrage d'une branche du circuit d'eau et solutions techniques

Les capacités hydrauliques de chacun des organes de réglage sont calculées à partir des débits et des pertes de charge associées à la branche du circuit considérée.

L'équilibrage peut s'effectuer à l'aide de deux grandes familles de produits : des vannes ou des diaphragmes. Les diaphragmes sont des disques minces percés en leurs centres, ils ne peuvent pas être ajustés après leurs installations.

Ainsi, la mise en place d'une vanne 2 voies en série dans un tronçon de réseau permet de réaliser cette opération.

$$J_{vr} = H - J_{branch}$$

Des diaphragmes peuvent être utilisés lorsque la perte de charge à réaliser est supérieure à 2 m [BouteloupD98] pour éviter tout inconvénient sonore provenant de la vanne. Ceux-ci sont sélectionnés par leur diamètre d'orifice  $d$  :

$$d[mm] = 11\sqrt{K_v}$$

La précision de cette relation simplifiée est de 10% si  $d/D < 0.22$  [BouteloupD98].

La caractéristique du diaphragme doit être signalée sur la tuyauterie par une plaque signalétique.

#### 1.9.5.4 Sélection et adaptation d'une pompe

La pompe est sélectionnée par rapport à la somme des débits traversant les différents échangeurs pour couvrir la hauteur manométrique de la branche du circuit la plus défavorisée ( $J_{totmax}$ ). Ainsi, la perte de charge totale la plus importante des branches du réseau permet le dimensionnement de la pompe :

$$P_{hydrau} = Qv J_{tot max}$$

Notons que le débit doit également être évalué en prenant en compte le régime de fonctionnement de la connexion hydraulique entre le circuit primaire et le circuit secondaire (1.9.5.5).

Les pompes sont généralement surdimensionnées. Une réduction du débit peut être appliquée au niveau du réseau par l'un des moyens suivants pour adapter la pompe sélectionnée :

- Par vanne de réglage en série
- Par vanne de réglage en parallèle
- Par réduction de la vitesse de rotation de la pompe
- Par diminution de diamètre de la roue de la pompe

#### 1.9.5.5 Dimensionnement d'une bouteille de découplage

Nous rappelons qu'il existe deux régimes de fonctionnement pour la connexion hydraulique en fonction du débit du primaire et du secondaire (voir paragraphe 1.7.4).

Nous nous intéressons dans cette partie au régime de fonctionnement casse pression différentiel afin de maintenir une température d'entrée du circuit de distribution constante.

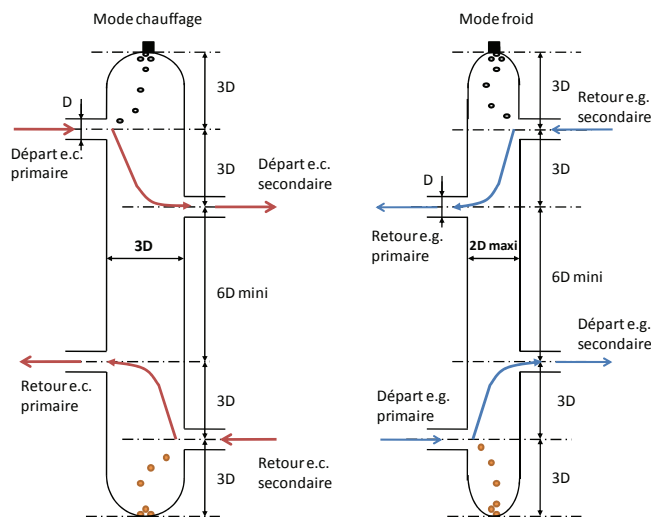


Figure 1-31 Règle des 3D, dimensionnement d'une bouteille de découplage

Afin d'éviter tout écoulement parasite entre l'entrée et la sortie il est nécessaire de respecter un dimensionnement réalisé à l'aide de la règle des 3D, cette règle permet d'assurer une vitesse de circulation faible ( $v < 0.1 \text{ m/s}$ ) et donc d'éviter les phénomènes de bi-circulation. Le diamètre  $D$  représente le diamètre de la plus grosse tuyauterie raccordée à la bouteille.

La position verticale est obligatoire afin de supprimer tout phénomène de convection naturelle entre l'entrée et la sortie. La position du tube d'entrée du circuit primaire est sélectionnée en fonction du mode de production. En effet si la bouteille de découplage est couplée à un réseau d'eau glacée, le tube venant du circuit primaire doit être raccordé en bas de la bouteille. Dans le cas d'un réseau d'eau chaude, l'entrée est obligatoirement positionnée en partie haute.

Généralement les bouteilles de découplage sont équipées en partie haute d'une purge et en partie basse d'une vanne de vidange permettant d'évacuer les boues éventuelles. Notons que la position des parties hautes et basses sont inversées entre le mode chauffage et froid. Ces positions permettent de maintenir le gradient de température dans la bouteille et ainsi s'assurer qu'aucun mouvement de l'eau par convection ne provoque des échanges de flux à contre courant. Mais cette position permet également d'éviter tout entrainement d'air ou de particules dans le réseau.

#### 1.9.5.6 Dimensionnement d'un bypass lisse

Le diamètre d'un bypass lisse doit être identique à celui des tuyauteries s'y raccordant. Le bypass doit être positionné en position verticale.

#### 1.9.5.7 Dimensionnement d'un ballon tampon

Le volume d'eau minimum d'un ballon tampon, noté  $V_{mini}$  en L, est déterminé en fonction du temps de marche minimum noté  $t$  en secondes, de la puissance frigorifique en réduction maximum noté  $P_{frigo\ mini}$  en kW, la capacité calorifique du fluide utilisé noté  $C_p$  (4180 J/(kgK) pour de l'eau) et du différentiel de température tout ou rien raccordé au dernier étage de puissance du compresseur entraînant son arrêt noté  $X_d$  (généralement 1 à 2 K).

$$V_{mini} = \frac{P_{frigo\ mini} t}{C_p X_d}$$

## 1.10 La maintenance d'une installation

Nous ne développons pas dans ce chapitre les différentes actions que l'équipe de maintenance doit effectuer régulièrement.

Toutefois, nous notons que la maintenance d'une installation peut se décomposer en trois types d'actions.

Le premier type correspond à une **action préventive**, c'est-à-dire la mise en place d'une action pour empêcher l'occurrence d'un défaut. Par exemple le nettoyage périodique d'un condenseur permet de maintenir périodiquement les propriétés de transfert thermique de l'échangeur.

Le deuxième type correspond à une **action corrective** c'est-à-dire la mise en place d'une action pour supprimer la cause d'un défaut détecté. Par exemple le calibrage des sondes de température intérieure permet de maintenir le confort de l'occupant.

Le troisième type correspond à une **action curative**, c'est-à-dire la mise en place d'une action pour supprimer le défaut détecté. Ce type d'action peut s'avérer temporairement efficace mais ne perdurera pas dans le temps. En effet, si le défaut intervient prématurément sur la durée de vie « normale » d'un équipement, il peut être envisageable de compléter ce type d'action par la mise en place d'une action corrective.

L'équipe de maintenance peut consigner ces différentes actions dans un registre. On notera que certaines de sociétés de maintenance utilisent un outil informatisé pour consigner cet ensemble d'informations : on parle dans ce cas de gestion de la maintenance assistée par ordinateur (GMAO).

## 1.11 Le confort thermique des occupants

Il ne faut pas oublier la fonction principale d'un système de climatisation : assurer le confort des occupants. Il est donc nécessaire de définir des critères permettant de quantifier cette notion.

Classiquement le confort est défini à l'aide d'indicateurs (PMV-PPD) cf. [ENISO7730]. Mais la norme européenne [EN15251] définit une **alternative à ces indicateurs plus opérationnelle**, en proposant une température comme critère de conception.

Cette norme distingue la nature du bâtiment et s'il y a ou non un traitement mécanique de l'air : ouvrir les fenêtres pendant la journée ou la nuit n'est pas considéré comme de la climatisation. Toute ventilation mécanique d'assistance (ventilateurs) est considérée comme de la climatisation.

Le niveau de confort exigé par type de bâtiment est réparti selon plusieurs catégories. Il existe quatre catégories d'activités / type de bâtiment, ces catégories sont présentées dans le tableau 1.

Catégorie	Explication
I	Niveau élevé attendu qui est recommandé pour les espaces occupés par des personnes très sensibles et fragiles avec des exigences spécifiques comme des personnes handicapées, malades, de très jeunes enfants et des personnes âgées.
II	Niveau normal attendu qu'il convient d'utiliser pour les bâtiments neufs et les rénovations.
III	Niveau modéré acceptable attendu qui peut être utilisé dans les bâtiments existants.
IV	Valeurs en dehors des critères des catégories ci-dessus. Il convient que cette catégorie soit acceptée seulement pour une partie restreinte de l'année.

Tableau 1-4 Description des niveaux de confort types selon [EN15251]

Ainsi, cette norme définit les températures acceptables d'été et d'hiver pour les différentes catégories de bâtiments. Notons que ces limites de températures sont basées sur des études de confort dans les bureaux qui ne prennent pas en compte les performances de travail des personnes. La Figure 1-32 présente les gammes de températures acceptables pour les catégories I, II et III et pour un bâtiment non climatisé.

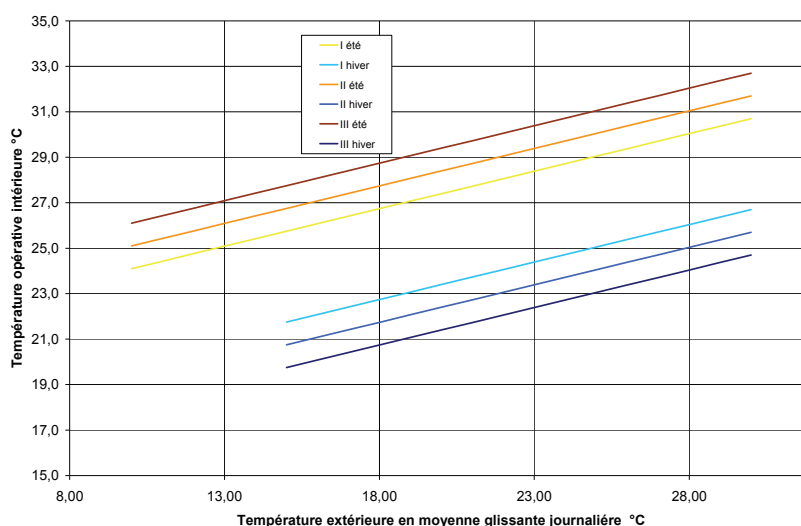


Figure 1-32 Schéma des valeurs de température acceptable pour un bâtiment non climatisé [EN15251]

L'utilisation de ces limites implique un accès facile à des fenêtres avec possibilité d'ouverture et des occupants pouvant librement adapter leurs codes vestimentaires. Pour les bureaux paysagés (ouverts) ces limites ne peuvent pas s'appliquer.



La température en moyenne glissante journalière ( $\theta_{rm}$ ) utilisée pour définir les limites de confort est définie de la manière suivante à l'aide de la température moyenne journalière ( $\theta_{ed}$ ) :

$$\theta_{rm} = (1-\alpha)(\theta_{ed-1} + \alpha\theta_{ed-2} + \alpha^2\theta_{ed-3} + \dots)$$

$$\theta_{rm} = (1-\alpha)\theta_{ed-1} + \alpha\theta_{rm-1}$$

Avec  $\theta_{rm} = 0.8 \theta_{rm-1} + 0.2 \theta_{Dm-1}$  et avec  $\theta_{Dm-1}$  la température moyenne journalière au jour n-1.

Les équations des droites présentées à la Figure 1-32, sont les suivantes :

Catégorie I	limite haute :	$\theta_{I\max} = 0,33 \theta_{rm} + 18,8 + 2$
	limite basse	$\theta_{I\min} = 0,33 \theta_{rm} + 18,8 - 2$
Catégorie II	limite haute :	$\theta_{I\max} = 0,33 \theta_{rm} + 18,8 + 3$
	limite basse	$\theta_{I\min} = 0,33 \theta_{rm} + 18,8 - 3$
Catégorie III	limite haute :	$\theta_{I\max} = 0,33 \theta_{rm} + 18,8 + 4$
	limite basse	$\theta_{I\min} = 0,33 \theta_{rm} + 18,8 - 4$

Cette norme propose également des limites de confort pour les bâtiments climatisés. Ces limites sont regroupées dans le Tableau 1-5.

Type de bâtiment ou d'espace	Catégorie	Température opérative °C	
		Minimum pour le chauffage (saison hivernale), ~ 1,0 clo	Maximum pour le rafraîchissement (saison estivale), ~ 0,5 clo
Bâtiments d'habitation : pièces de séjour (chambres, séjour, cuisine, etc.) Sédentaire - 1,2 met	I	21,0	25,5
	II	20,0	26,0
	III	19,0	27,0
Bâtiments d'habitation : autres espaces (rangements, circulations, etc.) Station debout — marche - 1,6 m/s	I	18,0	
	II	16,0	
	III	14,0	
Bureau individuel (fermé) Sédentaire - 1,2 met	I	21,0	25,5
	II	20,0	26,0
	III	19,0	27,0
Bureau payé (ouvert) Sédentaire - 1,2 met	I	21,0	25,5
	II	20,0	26,0
	III	19,0	27,0
Salle de réunion Sédentaire - 1,2 met	I	21,0	25,5
	II	20,0	26,0
	III	19,0	27,0
Auditorium Sédentaire - 1,2 met	I	21,0	25,5
	II	20,0	26,0
	III	19,0	27,0
Cafétéria/Restaurant Sédentaire - 1,2 met	I	21,0	25,5
	II	20,0	26,0
	III	19,0	27,0
Salle de classe Sédentaire - 1,2 met	I	21,0	25,0
	II	20,0	26,0
	III	19,0	27,0
École maternelle Station debout — marche - 1,4 m/s	I	19,0	24,5
	II	17,5	25,5
	III	16,5	26,0
Grand magasin Station debout — marche - 1,6 m/s	I	17,5	24,0
	II	16,0	25,0
	III	15,0	26,0

Tableau 1-5 Limites de confort pour un bâtiment climatisé [EN15251]

La notion de confort adaptatif permet d'étudier la possibilité de supprimer la production de froid tout en maintenant un flux d'air sur les occupants, et ce, en prenant en compte la température extérieure. La vitesse de l'air sera un paramètre permettant de maintenir un confort suffisant des usagers.



## 1.12 Synthèse de la bibliographie

Cette étude bibliographique illustre une variété de cas de systèmes envisageables, tant au niveau de l'architecture, de l'exploitation qu'au niveau du dimensionnement des différents équipements.

La compréhension et l'analyse des spécificités d'un système existant sont deux étapes préalables avant toute investigation de pistes d'amélioration. En effet, l'inspecteur ou l'auditeur devra s'appuyer sur cette connaissance pour proposer des solutions applicables au système existant. Ainsi, l'inspecteur ou l'auditeur doit effectuer sa **recherche de pistes d'économie d'énergie concurremment à l'étude de l'applicabilité des solutions pour le système existant**. Ces deux étapes forment ce que nous nommons **l'identification d'opportunités énergétiques**. Les méthodes d'identification que nous proposerons au chapitre 3 devront donc permettre de prendre en compte ces deux aspects.

D'autre part, nous avons mis en avant certains critères de dimensionnement et certaines règles à respecter pour assurer le bon fonctionnement du système de climatisation. Même si l'analyse de ces règles de l'art est une étape aidant à identifier certaines opportunités énergétiques, d'autres opportunités sont disponibles afin d'améliorer l'efficacité énergétique d'un système de climatisation. Nous proposons de les examiner dans le chapitre 2.

## Chapitre 2 Etablissement d'un référentiel d'opportunités énergétiques

Les investissements réalisés pendant la phase de conception d'une réhabilitation sont directement la conséquence de défauts fonctionnels ou la mise en place de nouveaux matériels permettant d'améliorer l'efficacité des équipements et du système. Nous ne traitons pas ici de la conception initiale mais d'une réhabilitation.

Une phase de conception est suivie d'une phase de travaux c'est-à-dire par la mise en place de nouveaux équipements, l'amélioration de l'enveloppe ou bien encore des actions visant à maintenir un état correct de fonctionnement du système par le biais d'opérations de maintenance ponctuelles. La phase de travaux s'accompagne, dans le meilleur des cas, d'un commissionnement. Le commissionnement comprend, le test et la mise en service du matériel ainsi que la vérification de la conformité des travaux avec ce qui était stipulé en phase de conception.

Lors de l'exploitation du système, le coût énergétique et humain lié à la conduite de l'installation n'est pas le seul coût. Si une panne importante du système est détectée, c'est-à-dire un défaut fonctionnel, un remplacement partiel du système est nécessaire : c'est une opération de maintenance.

Le cycle de vie se renouvelle ensuite jusqu'à la « vétusté » du système. Dans le cas d'une décision de réhabilitation, un investissement est nécessaire, celui-ci est généralement plus important que pour une opération de maintenance, car il requiert normalement une étude d'ingénierie. Par la prise en compte de données propres à chaque pays (climat, prix de l'énergie,...), il apparaît différents seuils économiques afin de prendre une décision de réhabilitation.

Dans le cas d'une panne importante ou d'une panne récurrente, il peut être intéressant d'examiner et de proposer une solution énergétiquement plus efficace que l'ancienne solution technique plutôt que de remplacer le matériel défectueux par un matériel identique. Le cycle de vie du bâtiment reprend ensuite.

Des investissements sont donc nécessaires pendant toute la durée de vie d'un bâtiment et d'un système de traitement d'air (Figure 2-1).

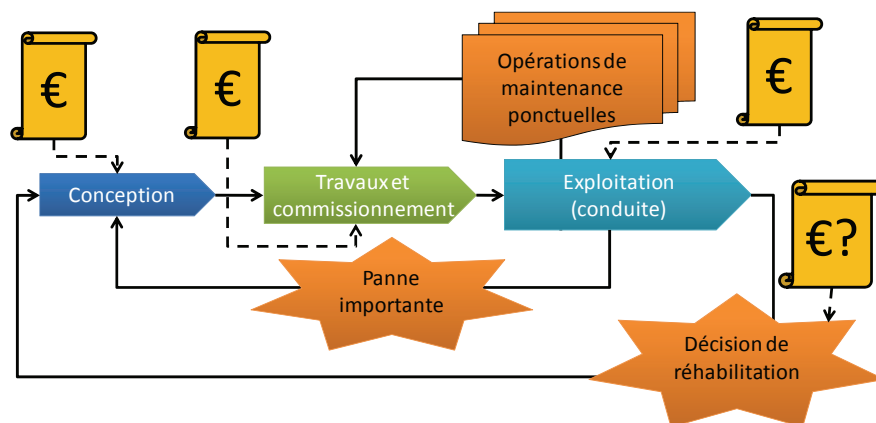


Figure 2-1 Cycle de vie simplifié d'un ensemble {bâtiment, système}

Pour chacune des phases d'investissement, les règles introduites au chapitre 1 sont celles reconnues comme « les bonnes pratiques » du milieu professionnel. Le « savoir faire » de chaque société peut influencer les choix de conception du système d'exploitation, ou d'installation, afin par exemple de garantir un confort absolu pour l'ambiance intérieure du bâtiment.

Mais, même si le confort est atteint, que devient l'efficacité énergétique du système ? Est-il possible de réduire la consommation sans réduire le confort ? Quelles sont les solutions techniques le permettant ?

Pour répondre à ces questions, nous proposons dans ce chapitre de formaliser un référentiel d'opportunités énergétiques. Pour illustrer ce référentiel, nous analysons une liste non exhaustive de solutions techniques permettant d'augmenter l'efficacité du système de climatisation à eau glacée et ce, en maintenant le confort des occupants.

## 2.1 Méthode pour établir un référentiel d'opportunités énergétiques

Nous appelons **inefficacité** ce qui engendre la surconsommation d'un équipement ou d'un ensemble d'équipement. Donc l'identification des inefficacités se traduit par la recherche des défauts énergétiques se traduisant par une efficacité énergétique non optimale.

Nous cherchons à **analyser tous les types de causes possibles qui rendent un système inefficace** en s'appuyant sur le cycle de vie d'une installation.

L'auditeur ou l'inspecteur devra ainsi explorer toutes les pistes possibles rattachées aux différentes étapes du cycle de vie du bâtiment et du système de climatisation.

Pour chacun des éléments constituant le système de climatisation, nous pouvons donc distinguer plusieurs facteurs à analyser pour déterminer les causes d'inefficacité. La recherche de ces facteurs est effectuée en se basant sur le cycle de vie du système et des équipements le constituant. Ces facteurs sont les suivants :

- La conception du système et de la régulation
- L'installation
- L'exploitation
- La maintenance de l'installation

Nous proposons de rechercher les causes d'inefficacité en examinant le système de climatisation / bâtiment et l'interface technologique reliant ces deux systèmes. Le système de climatisation peut être décomposé en trois fonctions :

- La production
- La distribution
- L'émission

Pour chacune de ces fonctions, il est nécessaire d'associer les postes de consommation énergétique. Ces postes sont :

- Le groupe de production d'eau glacée (GPEG) et le circuit de condensation
- Les réseaux hydrauliques et aérauliques
- Les échangeurs et les vannes de régulation associées

Pour le bâtiment, le besoin thermique est la combinaison de trois facteurs :

- Les charges internes produites par les occupants et les équipements (lumière artificielle, ordinateur,...)
- Les charges extérieures provenant du transfert thermique de l'enveloppe par les parois opaques, les vitrages, la ventilation et les infiltrations
- Le comportement capacitif dynamique de l'enveloppe

Dans le but d'améliorer la performance du système, qui n'est autre que le ratio du besoin thermique sur la puissance électrique consommée, il est envisageable d'améliorer la performance individuelle de chacun des postes de consommation, mais également de réduire et de maîtriser l'impact des trois facteurs influençant le besoin thermique.

Nous avons résumé cette analyse sur la figure suivante.

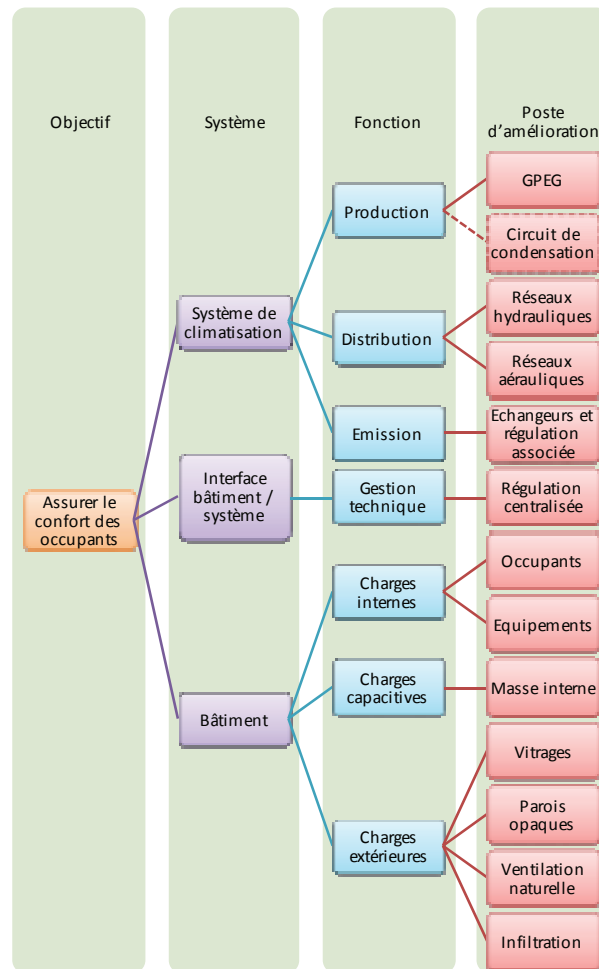


Figure 2-2 Recherche des postes d'amélioration

Pour chacun des postes de consommation nous proposons d'analyser le cycle de vie associé. Nous illustrons notre démarche en s'appuyant sur l'exemple d'un GPEG.

Lors de la phase de conception, le dimensionnement d'une installation s'effectue après une évaluation de la charge thermique maximale. Des règles de l'art reconnues par la profession peuvent être utilisées, comme celles que nous avons introduites au chapitre 1, paragraphe 1.9. Si ces règles ne sont pas respectées, le GPEG peut être surdimensionné. Comme nous le verrons au paragraphe 2.4.1, l'efficacité de certains GPEG se dégrade à charge partielle. Un redimensionnement en fonction de la charge thermique actuelle peut donc être nécessaire. Après l'évaluation de la charge thermique, le concepteur doit sélectionner un appareil pouvant répondre à cette charge. Il peut effectuer ce choix en fonction de son efficacité. Pour le guider dans ce choix, il peut par exemple utiliser un produit dont les performances sont classifiées et certifiées. Il peut utiliser la meilleure performance actuelle ou une performance moyenne. Ainsi il peut exister potentiellement une amélioration de la performance de la machine en fonction du critère de sélection du concepteur.

Lors de la phase d'installation, un non respect de conditions techniques spécifiées dans le cahier des charges peut compromettre l'efficacité de l'équipement. Nous n'aborderons pas davantage cet aspect dans notre travail.

Lors de la phase d'exploitation du groupe, il est possible de rencontrer deux situations. La première d'entre elles, consiste à piloter l'installation sans se soucier de son cadre spécifique d'installation. L'équipe d'exploitation propose alors un contrat « standard ». L'équipe d'exploitation pilote donc de façon standard le GPEG. Dans ce cas le non respect de règles de l'art peut entraîner des sanctions de la part du propriétaire. Mais,

que devient l'efficacité de ce service ? Pour améliorer la performance de la machine, l'équipe de maintenance doit intégrer un certain nombre de facteurs pour atteindre un pilotage personnalisé de l'installation. Une phase d'adaptation des règles de l'art est essentielle pour rendre « les recettes de cuisine » applicables à un cas particulier. L'arrêt des équipements en fonction des périodes d'occupation en est un exemple simple.

Lors de la phase de maintenance, nous rappelons qu'il existe trois types d'actions entreprises. Pour chacune de ces actions, il existe une réelle opportunité pour les améliorer :

- Pour les actions curatives, une analyse statistique de ces changements pourrait permettre de déterminer si le problème est normal ou pas. Donc la mise en place de ce référentiel pourrait permettre d'améliorer le service de maintenance.
- Pour les actions correctives, il peut être intéressant de mettre au point des indicateurs à l'aide de l'analyse des causes et d'un suivi/relevé régulier. Ce suivi peut alors permettre de détecter les variations temporelles des indicateurs. Une analyse de l'amplitude / fréquence de ces variations temporelles pourrait alors permettre d'agir préventivement sur le matériel en place. Le nettoyage ponctuel du condenseur en est un exemple.
- Pour les actions préventives, le non respect du calendrier de maintenance peut entraîner la mise en place d'actions correctives pouvant induire une surconsommation. Le nettoyage régulier du condenseur en est un exemple.

Nous avons donc recherché des pistes d'amélioration :

- En examinant chacune des étapes du cycle de vie d'un équipement
- En recherchant les actions élémentaires de ces étapes
- En recherchant un référentiel de comparaison
- En recherchant un indicateur explicite permettant une comparaison
- En concluant sur la possibilité d'une amélioration par une analyse de la cause de la différence entre l'indicateur et le référentiel

Nous avons synthétisé cette méthodologie sur la figure suivante. Cette démarche peut être utilisée pour chacun des postes que nous avons identifiés à la Figure 2-2.

Pour la réduction du besoin thermique, cette méthode peut être transposée facilement pour les améliorations de composants techniques. Pour l'impact de l'occupant sur le besoin thermique, une analyse du comportement est nécessaire.

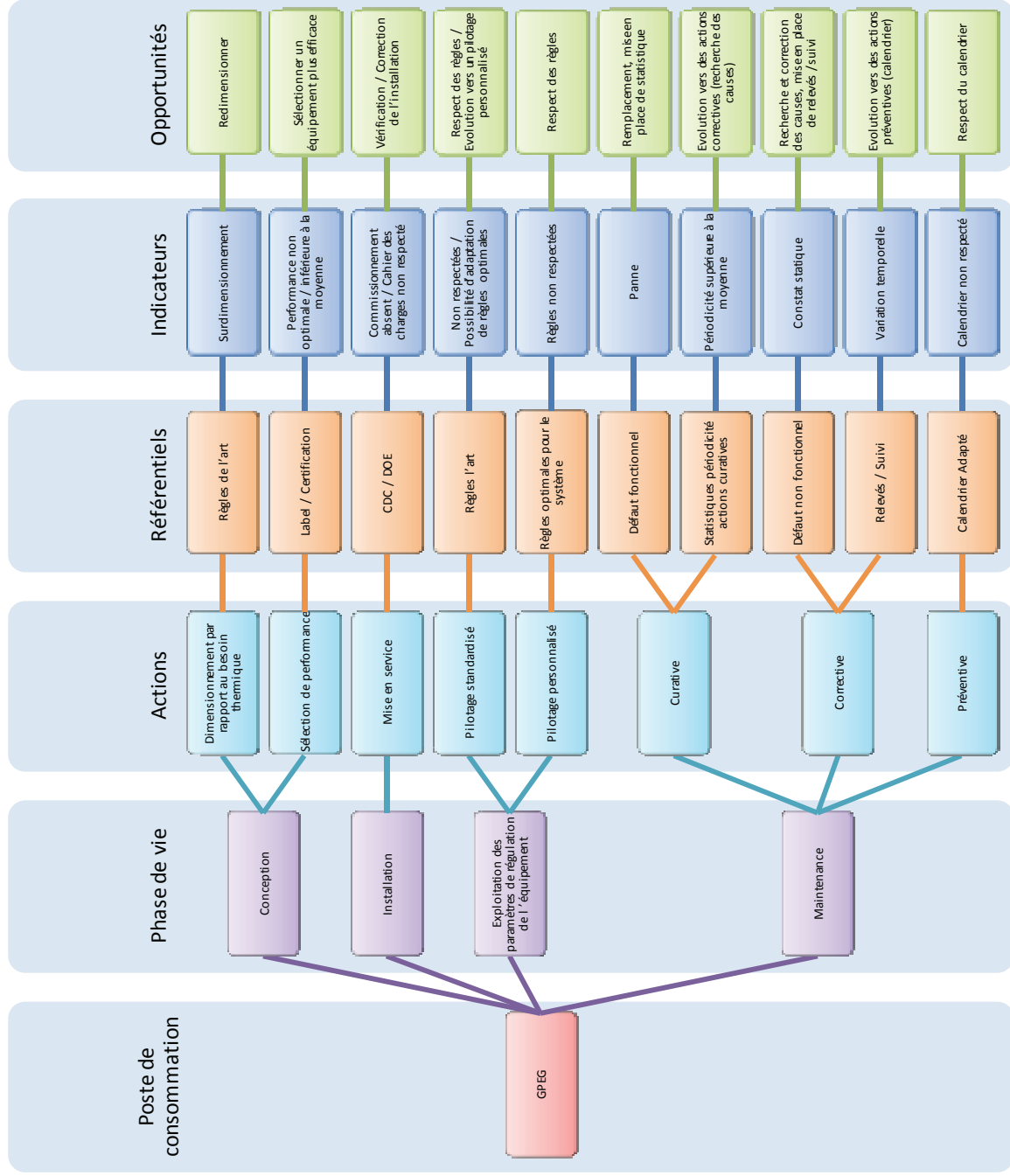


Figure 2-3 Recherche d'opportunité par analyse du cycle de vie d'un équipement

## 2.2 Analyse d'une liste d'opportunités

Nous proposons d'utiliser une liste d'opportunités énergétiques qui a été développée dans [Harmonac10]. Elle contient 137 opportunités (voir la liste complète en annexe 1), dont certaines sont reproduites en annexe 2 sous une forme de fiche détaillée [Caillet08]. La liste est issue de celle développée en 1987 dans [AIEAnnex11] mais des méthodes d'identification ont été développées dans ce travail.

Cette liste est constituée de manière à distinguer trois types d'améliorations :

- Les **améliorations apportées à l'enveloppe du bâtiment et aux charges thermiques**. Cette catégorie se nomme « Enveloppe » (codes E#.#).
- Les **améliorations apportées aux équipements**. Cette catégorie se nomme « Plant » (codes P#.#).
- Les **améliorations apportées à la maintenance et à l'exploitation**. Cette catégorie se nomme « Operation and Maintenance » (codes O#.#).

Nous avons ensuite distingué plusieurs sous-catégories. Nous avons explicité ces différentes catégories au Tableau 2-1.

Pour les améliorations apportées à l'enveloppe du bâtiment et aux charges thermiques, les sous catégories sont les suivantes :

- Les actions visant à réduire les apports solaires et à améliorer le contrôle de la lumière naturelle. Le code de cette catégorie est E1.#.
- Les actions visant à améliorer la ventilation, le mouvement de l'air et réduire les infiltrations. Le code de cette catégorie est E2.#.
- Les actions visant à améliorer l'isolation du bâtiment. Le code de cette catégorie est E3.#.
- D'autres actions visant à réduire les charges thermiques. Le code de cette catégorie est E4.#.

Pour les améliorations apportées aux équipements, les sous catégories sont les suivantes :

- Les actions visant à améliorer la visibilité des paramètres d'exploitation et rendre la gestion des équipements plus aisée. Le code de cette catégorie est P1.#.
- Les actions visant à améliorer l'efficacité des équipements frigorifiques en introduisant des machines plus efficaces ou en utilisant des solutions alternatives. Le code de cette catégorie est P2.#.
- Les actions visant à améliorer le réseau de distribution d'air. Le code de cette catégorie est P3.#.
- Les actions visant à améliorer le réseau de distribution d'eau. Le code de cette catégorie est P4.#.
- Les actions visant à améliorer les unités terminales. Le code de cette catégorie est P5.#.
- Les actions visant à reconcevoir l'architecture complète du système. Le code de cette catégorie est P6.#.

Pour les défauts constatés au niveau de la maintenance et de l'exploitation, les sous catégories sont les suivantes :

- Les défauts de la gestion générale de l'installation, via un manque de formation ou de compétence. Le code de cette catégorie est O1.#.



- Les défauts d'un contrôle correct de l'installation. Le code de cette catégorie est O2.#.
- Les défauts de la machine frigorifique. Le code de cette catégorie est O3.#.
- Les défauts du réseau de distribution des fluides (eau et air). Le code de cette catégorie est O4.#.

Code	ECO
E#.#	<b>Enveloppe et charges</b>
E1.#	Diminution des gains solaires / Amélioration du contrôle de la lumière naturel
E2.#	Amélioration de la ventilation / du mouvement d'air et réduction des infiltrations
E3.#	Isolation de l'enveloppe
E4.#	Autres actions permettant la réduction de la charge
P#.#	<b>Equipements</b>
P1.#	GTB contrôle / actions diverses
P2.#	Equipements de production frigorifiques / Refroidissement gratuit
P3.#	Traitement de l'air / Récupération de chaleur / Distribution de l'air
P4.#	Distribution de l'eau
P5.#	Unités terminales
P6.#	Remplacement du système
O#.#	<b>Exploitation et maintenance</b>
O1.#	Gestion générale de l'installation
O2.#	Eléments généraux d'une installation de chauffage et de climatisation
O3.#	Equipement de production frigorifique
O4.#	Réseaux de distribution des fluides (eau et air)

Tableau 2-1 Catégories et sous-catégories d'opportunités énergétiques

La liste complète est présentée à l'annexe 1.

Dans les paragraphes suivants, nous cherchons à appliquer le raisonnement de recherche des causes d'inefficacité du paragraphe 2.1 pour les relier à des opportunités énergétiques de cette liste. C'est-à-dire que nous allons explorer les différentes fonctions et postes de la Figure 2-2, rechercher les causes d'inefficacité pour les différentes phases du cycle de vie puis les relier aux opportunités de la liste.

Pour cela, nous nous appuierons sur les analyses que nous avons effectuées au chapitre 1, dans lesquelles nous avons décrit les règles de l'art pour les systèmes de climatisation à eau glacée. L'analyse se concentre sur les trois fonctions du système qui sont la production, la distribution et l'émission. Dans chaque cas, les phases du cycle de vie sont analysées pour identifier les opportunités énergétiques. Ainsi nous faisons appel aux connaissances du chapitre 1 pour concevoir un réseau d'eau glacée, dimensionner les équipements, les exploiter et effectuer leurs maintenances tout en respectant le confort des occupants.

## 2.3 L'efficacité de la distribution, une opportunité d'économie d'énergie ?

A l'aide de la classification de la liste d'ECO, nous avons extrait une sélection d'opportunités s'appliquant au réseau d'eau glacée pour les développer. Ces opportunités sont les suivantes :

- Equilibrer le réseau hydraulique (voir annexe 1, ECO O4.17)
- Utiliser la pompe de meilleure efficacité (voir annexe 2, annexe ECO P4.1)
- Mettre en place un débit d'eau variable (voir annexe 2, fiche ECO P4.5)
- Séquencer le chauffage et la climatisation centralement (voir annexe 2, fiche ECO O2.7)

Nous nous proposons de chercher les causes d'inefficacité d'un réseau d'eau glacée et de créer un lien avec ces opportunités en fonction des étapes du cycle de vie

### 2.3.1 Le non-équilage, une cause d'inefficacité ?

L'équilibrage du réseau est une étape nécessaire pour exploiter un réseau d'eau glacée. Cette opération doit s'effectuer après la mise en place physique de tous les constituants du réseau d'eau.

Cette étape a pour objectif de partager les débits d'eau et donc de distribuer de façon adéquate la charge fournie par le groupe de production en fonction des équipements assurant le traitement de l'air pour les différents besoins du bâtiment.

La sélection d'un échangeur permet de déterminer le débit nominal du fluide caloporteur, et son régime de température (côté eau). La température du réseau d'eau est assurée par le groupe de production, ainsi le débit d'eau d'une branche du circuit doit être imposé pour assurer la charge maximale d'une zone.

Si l'équilibrage du réseau n'est pas effectué, il est possible que le débit de la branche la plus éloignée soit en sous-débit alors que les autres branches sont en sur-débit. Un inconfort peut alors être détecté dans la zone alimentée par la branche la plus éloignée. Afin de connaître la valeur limite de débit pour laquelle la charge thermique ne peut être évacuée, il est nécessaire de connaître les caractéristiques thermiques des échangeurs.

En effet, une certaine tolérance de ce débit peut être admise compte tenu des caractéristiques des échangeurs. La variation de puissance échangée permet de définir cette tolérance. Les conséquences en termes de puissance échangée sont présentées dans les graphiques suivant [ASHRAEA07].

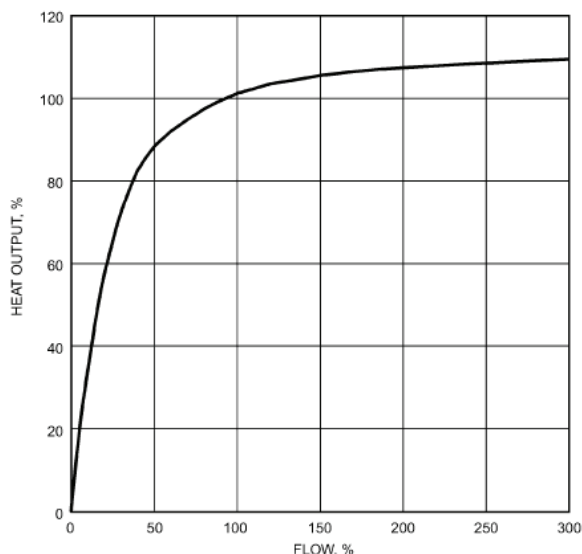


Figure 2-4 Variation de puissance pour une batterie chaude de CTA [ASHRAEA07]

L'analyse de cette courbe montre que la tolérance de débit est dissymétrique. Par exemple, pour un sous-débit de 50%, la puissance échangée est réduite de 12%, pour un sur-débit de 50%, la puissance échangée est augmentée de 7%.

Selon [BouteloupD98] cette tolérance de débit est moindre dans le cas d'une batterie froide. En effet, la condensation tend à faire diminuer cette tolérance. Par exemple pour un sous débit de 50%, la puissance échangée est réduite de 30%. La figure suivante illustre ce phénomène.

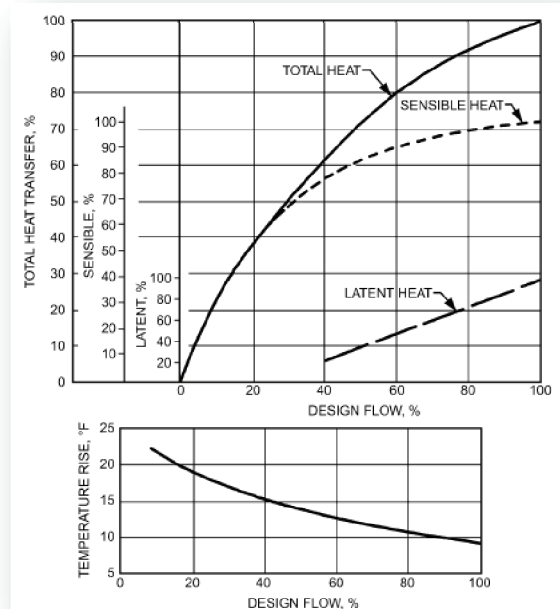


Figure 2-5 Variation de puissance d'une batterie froide en fonction du débit, d'après [ASHRAEA07]

Ainsi, pour essayer d'améliorer le manque de puissance de certaines zones, les « solutions » les plus simples à mettre en place sont les suivantes :

- Augmenter le débit de toute l'installation
- Modifier la consigne de température au niveau des groupes de production (augmentation pour la production d'eau chaude / diminution pour la production d'eau froide).

Pourtant, ces deux « solutions » augmentent la consommation de l'installation sans remédier au problème réel, l'équilibrage du réseau. En effet, pour un réseau déséquilibré, les échangeurs placés à proximité du générateur sont traversés par un débit excessif.

Un mauvais équilibrage du réseau peut donc engendrer directement un manque de confort thermique dans certaines zones du bâtiment. Mais indirectement ce déséquilibre peut entraîner une surconsommation de la pompe et la non-étanchéité de vanne(s). Nous reviendrons sur ce dernier point au paragraphe 2.3.6.3.

Il convient donc de proposer des solutions adéquates, comme la mise en œuvre d'un protocole d'équilibrage, pour assurer une performance énergétique accrue du système de distribution (voir annexe 1, ECO O4.17). Différentes procédures d'équilibrage existent. Elles requièrent une série d'action sur les vannes de réglages des différentes branches du réseau [Fridmann09] [BouteloupD98]. Notons que la première étape de cette procédure consiste à adapter le débit d'eau de la branche principale par rapport à la charge thermique maximale du bâtiment (cf. chapitre 1, paragraphe 1.9.5.4) (voir annexe 1, ECO O4.22).

La première étape nécessaire est d'identifier ce problème d'équilibrage du réseau. Un commissionnement du réseau permet d'identifier ce problème.

### 2.3.2 L'exploitation des pompes, une cause d'inefficacité ?

Comme nous l'avons indiqué au chapitre 1, paragraphe 1.8.1, un variateur de vitesse sur le système de pompage peut être réglé par les trois techniques suivantes :

- Utilisation d'un différentiel de pression constant
- Utilisation d'un différentiel de pression proportionnel
- Utilisation d'une stratégie basée sur la demande

Pour chacune de ces techniques de régulation, nous avons représenté l'économie de puissance hydraulique par rapport à une pompe à débit fixe. Pour cela, nous avons modifié la Figure 1-22, la Figure 1-23 et la Figure 1-24 du chapitre 1. Pour chacune des stratégies de contrôle, nous avons illustré schématiquement l'économie de puissance réalisée par rapport à une régulation à un débit fixe.

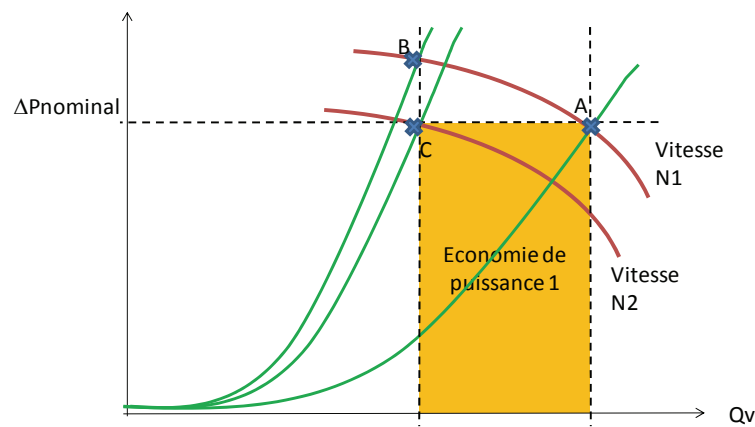


Figure 2-6 Economie de puissance pour une stratégie à différentiel de pression constant

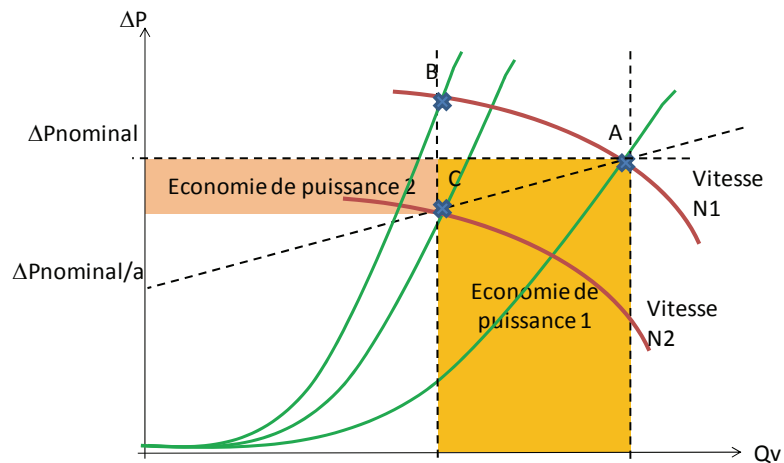


Figure 2-7 Economie de puissance pour une stratégie à différentiel de pression proportionnel

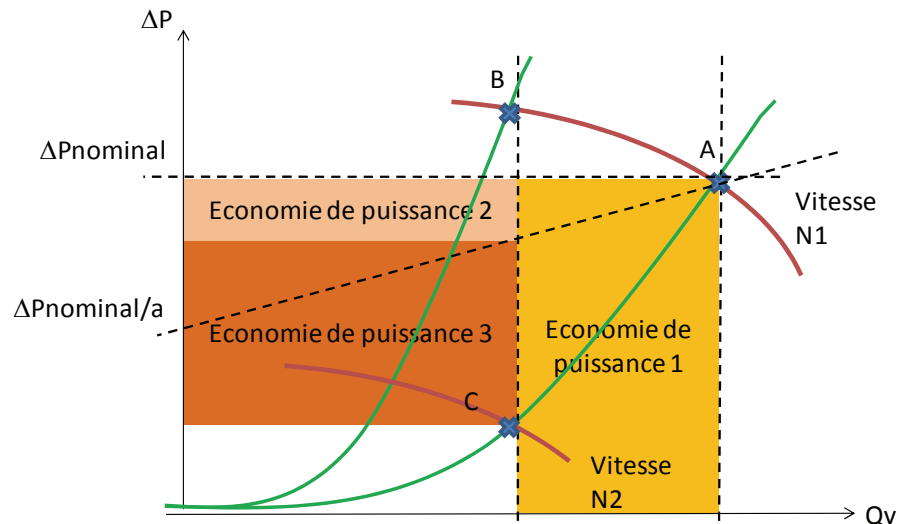


Figure 2-8 Economie de puissance pour une stratégie basée sur la demande

Nous venons de comparer la puissance appelée par une pompe à débit fixe à celle d'une pompe à débit variable.

On notera que nous avons présenté par ordre croissant l'économie de puissance appelée par les stratégies de régulation. Cette hiérarchie définit un ordre d'efficacité du système de régulation du débit.

Nous avons montré que l'efficacité du système de régulation du débit d'eau peut être une des causes d'une surconsommation. Cependant il est nécessaire de développer une procédure pour identifier les économies d'énergie résultantes du gain de puissance lié à la mise en place d'un système à débit d'eau variable (voir annexe 2, fiche ECO P4.5).

### 2.3.3 L'exploitation de la régulation centrale du réseau, une cause d'inefficacité ?

La consigne été / hiver choisie par l'exploitant n'est pas obligatoirement la solution optimale. L'étude de la consigne été / hiver et son influence sur la consommation énergétique et le confort demande l'utilisation de méthodes pratiques et faciles à mettre en place sur le terrain.

Le changement été / hiver peut s'effectuer en fixant une certaine date sur un calendrier, ce qui était encore il y a quelques années une obligation légale pour les établissements publics français. Mais, d'autres solutions peuvent être envisagées, ainsi l'utilisation de la température extérieure apparaît comme l'un de ces moyens. Des stratégies peuvent donc être développées sur la base des normes japonaises (cf. chapitre1, paragraphe 1.8.2.3) en prenant en compte le confort des usagers du bâtiment.

Le mode d'exploitation centrale du confort est plus qu'un changement de consigne été (26°C) et hiver (21°C). En effet, ce changement de mode est adéquat pour définir l'arrêt des équipements inutiles.

#### 2.3.3.1 Systèmes 4 tubes

Les besoins de chaud et les besoins de froid peuvent être assurés toute l'année grâce à un système 4 tubes. Toutefois, en France, les besoins de froid sont généralement inexistantes pour les applications tertiaires en hiver. De la même manière, les besoins de chaud sont inexistantes en été.

Les besoins en chaud et en froid peuvent être évalués au cours d'une année par la simulation d'un bâtiment. Une définition calendaire permet alors de définir la saison de chauffage et de rafraîchissement pour une année météorologique typique (voir annexe 2, fiche ECO P1.3 et fiche ECO O2.7).

### 2.3.3.2 Systèmes 2 tubes

La méthode précédente s'applique pour des systèmes quatre tubes. Un système deux tubes ne peut pas être exploité de la même manière. En effet pour une zone donnée, la distribution du chauffage ou la climatisation devront être pilotées, soit via la vanne de commutation, soit automatiquement en fonction de la température extérieure soit manuellement.

En effet ce type de système impose un antagonisme entre le fonctionnement de la chaudière et celui du groupe de production d'eau glacée.

Une date est normalement stipulée dans le contrat de maintenance, mais comme nous l'avons expliqué, au chapitre 1 paragraphe 1.8.2.2, cette date devrait être variable selon le climat pour optimiser le confort des occupants. Nous chercherons à proposer une méthode pratique pour optimiser le choix de cette date (voir annexe 2, fiche ECO P1.3 et fiche ECO O2.7).

### 2.3.4 La conception de l'architecture de réseau, une cause d'inefficacité ?

Dans le chapitre 1 paragraphe 1.7, nous avons souligné la nécessité de la présence d'organes d'équilibrage pour une régulation locale à vannes trois voies. Nous examinons ici l'impact d'une absence de ces organes.

Une des mauvaises solutions pour remédier à l'absence d'organe d'équilibrage du réseau est d'augmenter le débit de toute l'installation afin de palier le manque de débit d'eau dans les zones inconfortables. Cette solution a pour conséquence d'augmenter la puissance hydraulique de la pompe et donc sa consommation. Il est alors indispensable d'ajouter des vannes de réglage puis diminuer le débit par une régulation adaptée (voir annexe 2, fiche ECO P4.5) ou d'effectuer le remplacement de la pompe existante par une pompe correctement dimensionnée (voir annexe 2, fiche ECO P4.1).

### 2.3.5 La sélection de l'efficacité technique des composants du réseau, une cause d'inefficacité ?

Des améliorations techniques du système de pompage peuvent réduire de façon significative la puissance appelée à pleine charge et à charge partielle. Ainsi une réduction du frottement mécanique entre le rotor et le stator d'un moteur permet d'améliorer le rendement électrique de celui-ci. De la même manière, une réduction des pertes hydrauliques par une conception aérodynamique optimisée permet d'augmenter le rendement hydraulique du rotor d'une pompe ou d'un ventilateur (voir annexe 2, fiche ECO P4.1), et d'assurer le confort tout en minimisant la consommation.

### 2.3.6 Le dimensionnement du réseau, une cause d'inefficacité ?

#### 2.3.6.1 Le dimensionnement d'une pompe

L'étape de dimensionnement de la pompe repose principalement sur l'évaluation de la puissance hydraulique. Mais un coefficient de sécurité est souvent appliqué pour estimer cette puissance.

D'une part, le calcul de la charge conduit généralement à une surestimation du besoin réel et donc à une surestimation du débit d'eau nécessaire et par conséquent à un surdimensionnement de la pompe<sup>5</sup>.

D'autre part, un facteur de sécurité de 15% pour la perte de charge est généralement utilisé pour prendre en compte l'encrassement des tubes. Cependant ce facteur n'a pas lieu d'être utilisé pour les circuits fermés moins exposés aux particules qu'un circuit ouvert. En effet, pour un circuit fermé comportant une pompe étanche et un réservoir

---

<sup>5</sup> Une vanne de réglage a pu être installée afin de minimiser la surconsommation de la pompe.

tampon de bonne dimension, l'ajout d'eau est minime et donc l'apport d'oxygène également, ce qui limite la formation de rouille [Algh01].

Le choix d'un système de pompage surdimensionné peut également résulter du fait que

- Le concepteur a choisi une pompe plus importante pour des futurs besoins
- Le concepteur a installé deux pompes en parallèle et en laisse fonctionner une seule, la seconde étant utilisée en cas de défaillance de la première

Si le surdimensionnement de la pompe a été identifié, deux solutions sont alors à envisager :

- Le remplacement de la pompe par une pompe correctement dimensionnée. Lors de ce remplacement, une amélioration de l'efficacité technique (voir annexe 2, fiche ECO P4.1) peut être envisagée
- La modification du moyen de régulation de débit (voir annexe 2, fiche ECO P4.5) pour remplacer la vanne de réglage<sup>6</sup>

Ainsi des méthodes sont indispensables pour élaborer des procédures d'identification d'économie d'énergie.

#### 2.3.6.2 Le dimensionnement des vannes de régulation

Un mauvais choix des vannes de régulation conduit également à une surconsommation de la pompe malgré un dimensionnement conforme aux règles de l'art.

La puissance hydraulique fournie par la pompe s'écrit :

$$P_{hydrau} = Qv J_{tot max}$$

Dans le cas d'une ouverture maximale de la vanne, pour un circuit comportant un seul échangeur et une vanne 3 voies, la puissance hydraulique fournie par la pompe s'exprime à l'aide de l'autorité de la vanne par la relation suivante :

$$P_{hydrau} = K_{VS} \sqrt{\frac{a}{1-a}} J_r \left(1 + \frac{a}{1-a}\right) J_r$$

Ainsi l'autorité d'une vanne conditionne la consommation énergétique de la pompe. Une fiche d'ECO doit donc être ajoutée à la liste proposée en annexe 1.

#### 2.3.6.3 Les conséquences indirectes du dimensionnement de la pompe

Outre un coût d'exploitation plus important, une pompe surdimensionnée peut avoir des conséquences sur le confort des occupants. En effet, une pompe surdimensionnée peut produire une énergie assez importante pour ouvrir le bipasse du GPEG (vanne sous-dimensionnée). De plus les petites vannes ne résistent pas à l'énergie mécanique fournie par la pompe. Certaines zones (de faible puissance frigorifique installée) seront sur-refroidies. Cette indication peut être utile pour identifier le surdimensionnement de la pompe (voir paragraphe 2.3.6.1).

Une méthode doit donc être utilisée pour identifier les économies d'énergie potentielles.

<sup>6</sup> Nous entendons ici par vanne de réglage la vanne permettant de régler le débit de la pompe à la valeur calculée en phase de conception.



## 2.4 L'efficacité de la production, une opportunité d'économie d'énergie ?

A l'aide de la classification de la liste d'ECO, nous avons extrait une sélection d'opportunités s'appliquant à la production d'eau glacée et plus spécifiquement au groupe de production d'eau glacée (GPEG). Ces opportunités sont les suivantes :

- Remplacer le groupe de production (voir annexe 2, fiche ECO P2.6)
- Répartir la charge thermique sur plusieurs groupes (voir annexe 2, fiche ECO P2.3)
- Maintenir un temps correct du cycle de fonctionnement de la machine frigorifique (voir annexe 2, fiche ECO O3.5).
- Maintenir les températures d'évaporation et de condensation à un niveau correct (voir annexe 2, fiche ECO O3.7).
- Maintenir les débits à un niveau correct (voir annexe 2, fiche ECO 3.12).
- Maintenir le fonctionnement du détendeur de la machine frigorifique (voir annexe 2, fiche ECO O3.13).
- Maintenir la charge de fluide frigorigène (voir annexe 2, fiche ECO O3.15).
- Nettoyer les échangeurs côté air (voir annexe 2, fiche ECO O3.16).
- Nettoyer les échangeurs des tours de refroidissement ou du condenseur (voir annexe 2, fiche ECO O3.19).

Nous nous proposons de rechercher les causes d'inefficacité d'un groupe de production d'eau glacée et de créer un lien avec ces opportunités.

### 2.4.1 Le dimensionnement du groupe, une cause d'inefficacité ?

L'efficacité d'une machine frigorifique dépend de son taux de charge. Nous illustrons ce phénomène pour plusieurs types de machine frigorifique refroidi à l'air à la Figure 2-9. Par exemple, pour un compresseur bivis (courbe n°2 ou courbe n°9)) ou spiro-orbital (courbe n°5 ou courbe n°7), l'efficacité à charge partielle peut être supérieure à celle de pleine charge pour une température extérieure identique.

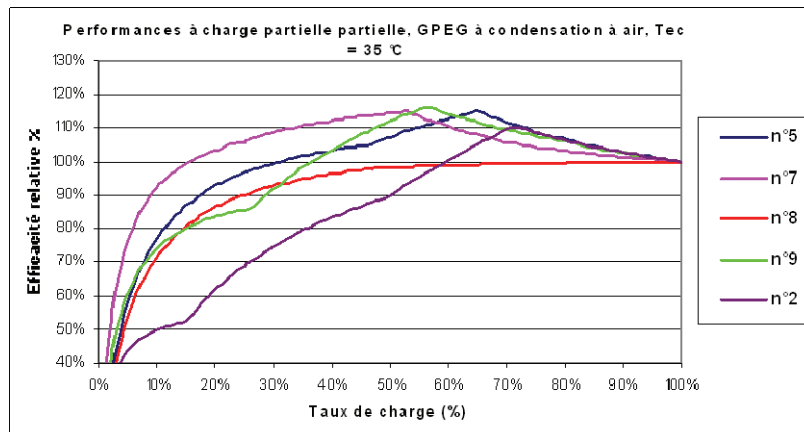


Figure 2-9 Efficacité relative de groupe frigorifique, extrait de [Riviere04]

Si le groupe est surdimensionné, il aura tendance à fonctionner plus de temps à faible taux de charge. Ainsi, si son efficacité est plus faible à charge partielle, la consommation en sera augmentée.

De plus un phénomène de court-cycle peut apparaître ce qui augmente sa consommation et diminue sa durée de vie.



Toutefois, il est essentiel d'examiner la technique de régulation utilisée dans une machine installée pour pouvoir conclure sur l'utilité d'un remplacement du groupe en cas de surdimensionnement (voir annexe 2, fiche ECO P2.6).

Par exemple, il existe trois techniques de contrôle pour augmenter la performance à charge partielle d'une machine frigorifique à piston :

- La première consiste à mettre hors service un ou plusieurs cylindres de la machine en maintenant la soupape d'aspiration
- La deuxième consiste à obturer l'entrée de l'orifice d'aspiration
- La troisième consiste à faire varier la vitesse du compresseur et donc le débit de fluide frigorifique.

Bien entendu les deux premières approches sont moins efficaces énergétiquement que la troisième. Ces techniques améliorent donc le contrôle intrinsèque de la machine frigorifique et sont mises en œuvre par les fabricants de matériel pour augmenter la performance d'une machine à charge partielle. Il est donc important d'examiner la régulation intrinsèque d'un groupe et le temps de fonctionnement à charge partielle pour conclure sur la pertinence d'un remplacement du GPEG.

On notera également que l'effet de cyclage et donc l'impact potentiel du surdimensionnement peut être limité en introduisant un ballon tampon sur le circuit primaire du réseau d'eau.

### 2.4.2 La mauvaise sélection de l'efficacité du groupe de production, une cause d'inefficacité ?

La consommation du compresseur d'un groupe frigorifique dépend de son efficacité à pleine charge et à charge partielle, comme celui d'un moteur. Ainsi des améliorations techniques apportées par les constructeurs peuvent réduire de façon significative la puissance appelée à pleine charge et à charge partielle. Un remplacement du groupe peut ainsi être envisagé (voir annexe 2, fiche ECO P2.6).

### 2.4.3 L'exploitation des groupes frigorifiques, une cause d'inefficacité ?

Par exploitation des GPEG, nous entendons les éléments permettant de contrôler leur fonctionnement. Ceci inclut donc les éléments permettant de réguler la puissance mais également la température de consigne du réseau d'eau.

#### 2.4.3.1 La régulation centrale de la température du réseau

Nous avons mis en évidence dans la partie 1.3 qu'une loi d'eau pouvait être utilisée pour définir la température de consigne du groupe. Cette loi permet d'augmenter la température d'évaporation du fluide frigorigène et donc d'augmenter l'efficacité du cycle frigorifique (voir annexe 2, fiche ECO P2.5).

#### 2.4.3.2 La régulation d'un ensemble de groupes frigorifiques

La régulation du séquençage des groupes de production peut être optimisée en fonction des performances de chacune des unités de production (voir annexe 2, fiche ECO P2.3).

### 2.4.4 La maintenance du groupe frigorifique, une cause d'inefficacité ?

A l'aide du travail de [Bory08], nous avons répertorié différentes causes qui entraînent une surconsommation d'un groupe de production d'eau glacée :

- Les fuites de fluide frigorigène ou la présence d'incondensables dans le condenseur
- L'encrassement côté air du condenseur

- L'encrassement côté eau du condenseur
- L'obstruction du détendeur
- Un manque d'huile dans le compresseur

Notons qu'un manque d'huile provoque une surchauffe du compresseur et un arrêt normalement automatique de celui-ci. Nous écartons cette piste dans la suite de notre travail.

Il est donc nécessaire de :

- Maintenir la charge de fluide frigorigène et éliminer les incondensables par une purge du circuit (voir annexe 2, fiche ECO O3.15)
- Nettoyer les échangeurs du condenseur côté air (voir annexe 2, fiche ECO O3.16).
- Nettoyer le condenseur côté eau (voir annexe 2, fiche ECO O3.19).
- Maintenir le fonctionnement du détendeur de la machine frigorifique (voir annexe 2, fiche ECO O3.13).

Toutefois ces différentes actions peuvent être décidées à la suite des actions de maintenance suivantes :

- Maintenir les débits à un niveau correct (voir annexe 2, fiche ECO 3.12)
- Maintenir les températures d'évaporation et de condensation à un niveau correct (voir annexe 2, fiche ECO O3.7)

Des règles expertes permettent alors de choisir l'action à mettre en place pour maintenir le niveau de performance de la machine frigorifique.

## 2.5 L'efficacité de l'émission, une opportunité d'économie d'énergie ?

A l'aide de la classification de la liste d'ECO, nous avons extrait une sélection d'opportunités s'appliquant à l'émission. Ces opportunités sont les suivantes :

- Séquencer le chauffage et la climatisation localement (voir annexe 2, fiche ECO P1.3 et fiche ECO O2.7)
- Modifier le système de contrôle pour ajuster la température de consigne intérieure en fonction des conditions climatiques extérieures (voir annexe 2, fiche ECO P1.4)
- Mettre en place des échangeurs surdimensionnés (voir annexe 2, fiche ECO P5.3)

Nous proposons de rechercher les causes d'inefficacité du contrôle du confort et de créer un lien avec ces opportunités.

### 2.5.1 La maintenance de l'émission, une cause d'inefficacité ?

Comme nous l'avons exposé au chapitre 1, paragraphe 1.2.2 (Figure 1-12), l'utilisation d'une bande morte pour les consignes de température est obligatoire pour assurer la stabilité du système de régulation des batteries des systèmes deux tubes et pour ne pas chauffer et refroidir l'air traversant les batteries d'un système quatre tubes (cf. chapitre 1, paragraphe 1.3.4). Ainsi le contrôle de la bande morte du régulateur pilotant les vannes des émetteurs permet de maintenir la stabilité du système et d'éviter un possible gaspillage d'énergie pour les systèmes à quatre tubes<sup>7</sup> (voir annexe 2, fiche ECO P1.3 et fiche ECO O2.7).

Si la consigne de température et / ou le confort des occupants ne sont pas respectés lorsque la climatisation est en fonctionnement, il est nécessaire de vérifier et de maintenir le système de contrôle (voir annexe 1, ECO O2.4).

### 2.5.2 L'exploitation du contrôle local, une cause d'inefficacité ?

Si la température de consigne est faible<sup>8</sup>, il est envisageable de l'augmenter.

La plupart des régulateurs d'ambiance intérieure ont la même consigne pour la période d'occupation comme pour la période d'inoccupation. Dans ce cas, il est possible d'envisager la mise en place de ce type de stratégie en utilisant deux consignes différentes (voir annexe 1, ECO O4.1).

De plus, il est également envisageable de mettre à l'arrêt les ventilateurs des émetteurs en période d'inoccupation (voir annexe 2, fiche ECO O2.3).

Dans certains bâtiments il est possible de créer une nouvelle stratégie de contrôle local : la climatisation est coupée la nuit et sa remise en route s'effectue manuellement par l'occupant lorsque sa perception du confort thermique n'est pas satisfaisante. Ce système de contrôle hybride implique plusieurs hypothèses quant aux caractéristiques du bâtiment. Afin d'assurer une accessibilité facilitée aux fenêtres et ainsi permettre d'utiliser un rafraîchissement de l'ambiance intérieure par ventilation naturelle, les bureaux doivent être de petite taille et comporter peu d'occupants. Les fenêtres doivent être équipées de contact de type feuillure pour empêcher tout gaspillage énergétique. Ce type de contrôle pourrait être proposé aux gestionnaires afin de réduire la consommation énergétique du bâtiment. Afin de quantifier l'impact énergétique il convient de modéliser ce type de contrôle. Afin de prendre en compte une certaine

<sup>7</sup> Ainsi que pour les systèmes deux tubes / deux files pour lesquels la résistance électrique peut être pilotée indépendamment du débit d'eau.

<sup>8</sup> Au niveau français, réglementairement parlant, la température de consigne doit être supérieure à 26°C pour un local climatisé [POPE07]

dérive de température pendant la période de non climatisation, une hypothèse sur les limites de confort dans de telles conditions peut être établie (voir annexe 2, fiche ECO P1.4).

A travers ces trois stratégies de contrôle, nous avons proposé de piloter les émetteurs en personnalisant de plus en plus les règles d'exploitation.

### 2.5.3 La sélection des émetteurs, une cause d'inefficacité ?

Si on envisage de surdimensionner les échangeurs alors que le confort est respecté (voir annexe 2, fiche ECO P5.3), il est alors possible d'augmenter la température du réseau afin d'améliorer l'efficacité de la machine de production.

## 2.6 La maîtrise du besoin thermique du bâtiment

Nous proposons d'examiner plus en détail ces opportunités et les modèles physiques associés. Nous rappelons (chapitre 1, paragraphe 1.8.2.2) que le bilan thermique d'une zone s'écrit :

$$\begin{cases} Q_{zone} = Q_{env} + Q_{sens} + Q_{latent} + Q_{vent} + Q_{solaire} + Q_{inertie} + Q_{inf} \\ Q_{env} = KS (T_{ext} - T_{in}) \\ Q_{vent} = \dot{m} C_{p\ air} (T_{ext} - T_{in}) \end{cases}$$

Avec  $Q_{zone}$  le flux de chaleur reçu par la zone thermique,  $Q_{env}$  le flux de chaleur traversant l'enveloppe (W),  $Q_{sens}$  la chaleur sensible due aux apports internes (W),  $Q_{latent}$  la chaleur latente due à l'évaporation (W),  $Q_{vent}$  la chaleur provenant du système de ventilation (W),  $Q_{solaire}$  les apports solaires (W),  $Q_{inertie}$  la chaleur libérée par la structure capacitive du bâtiment (W),  $Q_{inf}$  la chaleur due aux infiltrations d'air de l'enveloppe (W).

La réduction de la consommation électrique des équipements de bureautique et de l'éclairage permet de diminuer la charge thermique sensible interne de la zone thermique. Ainsi l'utilisation d'équipements électriques labellisés « Energy Star » ou basse consommation (voir annexe 2, fiche ECO E4.5) ou d'un système d'éclairage basse consommation (voir annexe 2, fiche ECO E4.6) permet de réduire la charge thermique de l'installation.

L'installation de protections solaires (voir annexe 2, fiche ECO E1.2), ou le contrôle des protections solaires (voir annexe 2, fiche ECO E1.3) permettent de maîtriser le flux solaire. Une amélioration de l'enveloppe par une isolation extérieure de la toiture (voir annexe 2, fiche ECO E3.1), ou l'utilisation d'une couleur appropriée pour les façades du bâtiment (voir annexe 2, fiche ECO E4.2) permet de réduire les flux de chaleur transmis par l'enveloppe.

La mise au point d'une stratégie de ventilation nocturne permet le stockage de froid dans la structure capacitive du bâtiment. Ainsi cette stratégie permet de réduire le besoin thermique de l'installation (voir annexe 2, fiche ECO E2.1).

## 2.7 Synthèse des opportunités énergétiques

L'analyse de la **conception** du système renseigne l'inspecteur / l'auditeur sur la « *conformité* » aux *règles de dimensionnement et sur les choix technologiques* « *performants ou non* » pour les équipements et pour leurs régulations.

L'analyse de l'**exploitation** du système renseigne l'inspecteur / l'auditeur sur « *la performance* » des *règles techniques utilisées* pour piloter le système et sur *la possibilité de les améliorer*.

L'analyse de la qualité de l'**installation** des équipements renseigne l'inspecteur / l'auditeur sur la « *conformité* » du système existant par rapport *au cahier des charges de conception ou à l'évolution de la réglementation* ou encore sur *l'évolution de l'usage du bâtiment*.

L'analyse de la **maintenance** de l'installation renseigne l'inspecteur / l'auditeur sur « *la présence* » de défauts d'entretien. Pour cela il doit s'appuyer sur la connaissance des *règles régissant la profession*.

Nous avons implicitement introduit, dans les différents exemples précédents, différents « *indicateurs* » et *critères*.

Au chapitre 1, nous avons, d'ores et déjà, introduit un certain nombre de règles de l'art comme le dimensionnement et l'exploitation standard des équipements. Le respect (ou non) de ces règles de références peut être utilisé pour formuler un indicateur.

Il est alors indispensable de proposer un cadre méthodologique cohérent avec les opportunités rencontrées dans ce chapitre pour permettre de développer des critères et des indicateurs associés à chaque opportunité énergétique.

Dans ce cadre, nous proposons, au chapitre 3, d'examiner différentes méthodologies permettant de formaliser ces critères et ces indicateurs pour identifier des opportunités énergétiques.



## Chapitre 3 Comment identifier des opportunités énergétiques ?

Après avoir synthétisé les connaissances utilisées par le milieu professionnel tant au niveau de la conception que de l'exploitation et proposé une liste d'opportunités à examiner en fonction du cycle de vie des équipements, nous analysons les méthodes existantes d'identification d'économies d'énergie.

Nous cherchons à développer ces méthodologies pour définir des procédures d'identification applicables par les professionnels sur site. Ces méthodologies doivent être capables d'utiliser des ensembles de données expérimentales provenant de bâtiments et systèmes existants, mais également des résultats d'outils d'évaluation permettant de simuler des systèmes et bâtiments aux paramètres adéquatement sélectionnés (Figure 3-1).

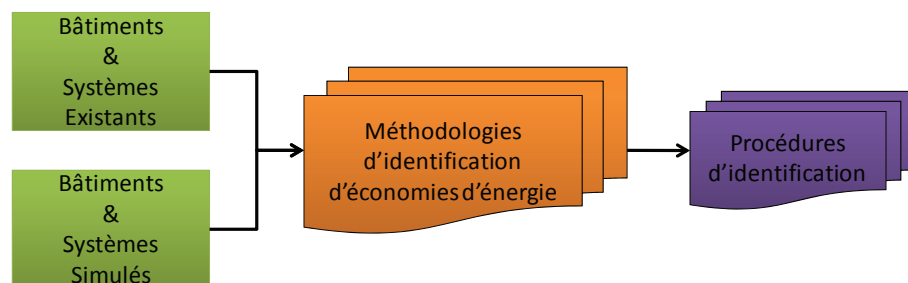


Figure 3-1 Développement des méthodologies d'identification

Ces méthodologies globales doivent permettre d'inclure une étude de l'impact énergétique de l'opportunité concurremment à l'étude d'applicabilité de la solution.

L'étude de l'applicabilité de la solution, appuyée par un ensemble d'informations provenant des bâtiments et systèmes existants, regroupe à la fois la recherche des informations et la quantification du temps nécessaires pour identifier des opportunités énergétiques.

On devra également vérifier que la fonction principale du système de traitement d'air est assurée, c'est-à-dire que le confort des occupants est maintenu.

Ces méthodes permettent de définir des procédures d'identification d'économie d'énergie. Ainsi, les procédures produites comprennent les informations nécessaires afin d'identifier et quantifier l'économie d'énergie associée. L'identification des opportunités énergétiques du chapitre 2 sera alors possible à l'aide de ces procédures.

La structure de ces procédures est schématisée sur la Figure 3-2 : quand le professionnel travaille sur un bâtiment existant spécifique, il bénéficie de l'expérience accumulée sur l'univers des bâtiments et des systèmes grâce aux méthodologies.

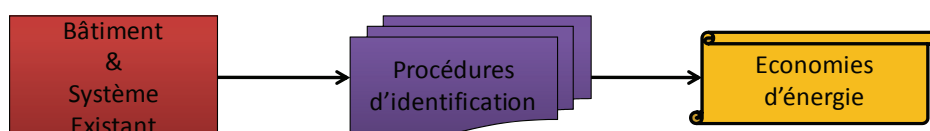


Figure 3-2 Instanciation des procédures sur un bâtiment spécifique

Chacune de ces procédures pourra être élaborée dans un contexte particulier en se fixant des contraintes supplémentaires comme par exemple le niveau de connaissance des utilisateurs.



Tout comme dans le domaine de la médecine, chaque bâtiment doit être regardé de manière individuelle. Même si deux bâtiments ont été construits au même moment, avec les mêmes plans, les mêmes équipements, les bâtiments sont utilisés différemment, sont contrôlés différemment, maintenus différemment et donc seront sujets à des opportunités et défauts différents. Ces bâtiments ont besoin d'être traités différemment. Ainsi, les méthodologies et les procédures établies doivent prendre en compte ces spécificités.

Nous nous attachons dans ce chapitre à mettre au point une méthodologie d'identification d'opportunités énergétiques. Trois types de méthodologies ont été repérés et développés dans cette thèse :

- L'utilisation d'un benchmark : ces méthodologies font l'objet de la partie 3.1.
- Les méthodes de détection de défauts utilisées dans la maintenance : ces méthodologies font l'objet de la partie 3.2.
- Les méthodes d'inspection normative : ces méthodologies font l'objet de la partie 3.3.

### 3.1 Méthodologie de benchmarking

La première approche que nous proposons pour identifier des opportunités, consiste par exemple à comparer plusieurs bâtiments/systèmes à un « *idéal* » ou entre eux. Cette méthode est donc une analyse comparative. La méthodologie de benchmark repose en partie sur cette analyse mais également permet de définir un « *idéal* ». Nous reviendrons plus en détail sur la définition de la stratégie de comparaison au paragraphe 3.4.

#### 3.1.1 Critères et index

En effet, le but d'une méthodologie de benchmark est de permettre à une société de se comparer à une autre afin d'améliorer certains points. Par exemple, le bâtiment A est identique au bâtiment B à tout point de vue (même climat, même type d'occupation, même système, même enveloppe) excepté la gestion. La consommation du bâtiment A est inférieure par rapport à celle du bâtiment B, dans ce cas on pourra dire que la gestion du bâtiment A est la plus performante. La formulation d'un index, ici la consommation énergétique, permet de tirer des conclusions sur le potentiel d'amélioration, par exemple la gestion du bâtiment.

Cette comparaison peut utiliser un petit nombre de critères comme par exemple l'efficacité du système de ventilation ( $\text{kWh/m}^3$ ) [Tschudi04]. Ces **critères** sont appelés **index**. Ainsi, cette comparaison peut par exemple amener à identifier les systèmes « *les plus performants* », à placer le cas d'étude dans cette échelle de performance et enfin à rendre prioritaire l'examen d'opportunités énergétiques pour les systèmes existants. Dans ce cas, le benchmark doit donc s'appuyer sur une « *échelle de performance* » de solutions techniques pour identifier les causes d'inefficacité.

L'approche de la méthodologie de benchmark nécessite que l'on puisse définir des index c'est-à-dire qu'un critère unique traduise la possibilité d'une amélioration ou son absence. Ces critères doivent être définis en adéquation avec l'opportunité recherchée. Ces critères peuvent être **des nombres ou des règles**. Dans le cas d'un **nombre**, nous l'appelons **index de performance**.

#### 3.1.2 Méthode de détermination in-situ d'un index de performance

L'index de performance d'une population peut être :

- Une performance mesurée expérimentalement sur un échantillon de référence de cette population. Ce **benchmark expérimental** repose sur un nombre significatif d'études réelles.
- Une performance estimée. Ce **benchmark estimé** repose sur des modèles permettant de reconstituer un échantillon de référence de la population.

Dans tous les cas, les index doivent être représentatifs d'un échantillon de *référence*.

#### 3.1.3 Niveaux d'application et unité d'un index de performance

La formulation d'un index peut s'appuyer sur un examen d'un ensemble d'équipements climatisant une zone ou la totalité du bâtiment, on parlera dans ce cas de **benchmark global**.

Mais la formulation d'un index peut s'effectuer directement au niveau d'un équipement dans ce cas on parlera de **benchmark partiel**.

Comme nous venons de l'indiquer, les index peuvent être élaborés à différents niveaux et ce, formalisant un index de référence, mais les exemples d'application illustrent que les index peuvent être formulés de manière différente :

- Ils sont utilisés, par exemple à l'échelle du bâtiment, pour définir un label énergétique d'un bâtiment existant dans le domaine tertiaire. Le mécanisme de Diagnostic de Performance Énergétique (DPE) en tertiaire illustre l'utilisation de

benchmarks, à l'aide de valeurs limites de consommation par m<sup>2</sup>. On parlera dans ce cas de **benchmark énergétique**.

- Ils pourraient indirectement être utilisés, par exemple à l'échelle d'un équipement, pour définir la valeur d'un certificat d'économie d'énergie. Ou encore on pourrait utiliser certaines informations techniques, comme la classe énergétique d'un appareil ou son coefficient de performance pour élaborer une estimation de l'économie d'énergie. On parlera, dans ce dernier cas, de **benchmark indicatif**.

### 3.1.4 Analyse d'exemples de benchmark

L'approche la plus « classique » d'un index de performance s'exprime en kWh/m<sup>2</sup>. Ainsi, [Chung06], [Chung09] et [Sharp96] s'accordent à dire que les benchmarks énergétiques principalement utilisés sont simplement la consommation énergétique normalisée par la surface du bâtiment comme l'illustre son utilisation dans [Filippin00], [ElAreport95], [eBenchmark03], [Yik01] ou bien encore [Ballarini09].

Ainsi, l'approche la plus basique se présente sous la forme d'un tableau (tableaux 3 et 4). Un exemple est donné dans [Dupont06], où celui-ci propose une méthode d'audit pour des bâtiments tertiaires. L'évaluation du surdimensionnement des installations s'effectue dans sa méthodologie à l'aide de benchmarks expérimentaux. Celui-ci distingue plusieurs secteurs d'activité, et types de système pour définir sa base de données. Les deux tableaux (Tableau 3-1 et Tableau 3-2) suivant reprennent les études statistiques utilisées.

Secteur d'activité du bâtiment	Charges thermiques (W/m <sup>2</sup> )
Bureau (en moyenne)	125
Zones intérieures*	70
Zones périphériques** – 60% de surface vitrée	120
Zones périphériques** – 65% de surface vitrée	180
Banque	160
Salle informatique	400
Hôtel	150 – 300
Restaurant	220
Commerce	140
* Plus de sept mètres des murs extérieurs	
** Moins de six mètres des murs extérieurs	

Tableau 3-1 Benchmark de la charge thermique en fonction du secteur d'activité [BSRI03]

Type d'installation de climatisation	Puissance frigorifique installée (W/m <sup>2</sup> SHON)	
	EDF R&D <sup>1</sup> (secteur d'activité)	Littérature (échantillon/minimum/maximum)
Multi-blocs	70 (bureaux)	-
Multi-blocs	100 (commerces)	-
Multi-blocs DRV	80 (bureaux)	80 (5/37/137)
VCV	100 (bureaux)	100 (4/76/133)
VCV	70 (hôtels)	-
Surface froide	-	75 (6/50/127)
CTA (avec ou sans VCV)	-	95 (6/28/173)
Unité de toiture	100 (industrie)	125 (4/72/198)

Tableau 3-2 Benchmark de la puissance installée par type d'installation et d'activité [Dupont06]

Dans ce tableau, la variabilité des index obtenus dans la littérature démontre que la base de données utilisée n'est pas assez détaillée ou que les statistiques utilisées ne sont pas adaptées à ce problème. De plus, Dupont [Dupont06] démontre dans une étude de cas, qu'à partir d'une analyse des ratios couramment rencontrés dans ce secteur, que **cette information seule ne permet pas d'identifier d'améliorations possibles**.

Dans [Kalz10], les auteurs proposent de classer, selon trois critères, les bâtiments sous forme graphique. Cette classification est effectuée en chauffage et en climatisation en prenant en compte différentes classes de confort thermique, la consommation thermique annuelle normalisée par la surface du bâtiment, et le rendement annuel de l'installation c'est-à-dire le ratio entre la puissance thermique consommée et la consommation en énergie primaire. Différentes limites ont été définies pour chacun de ces trois index pour comparer différents bâtiments d'une base de données expérimentales et ainsi identifier des pistes d'amélioration.

D'autres auteurs proposent de présenter sous la forme d'une équation l'index de performance. Cette représentation tend à se rapprocher de la méthode proposée en chauffage comme la méthode de signature énergétique [Corgnati08], afin de présenter une corrélation entre ces facteurs et la consommation [Lam10], et ce en intégrant les facteurs principaux des conditions météorologiques (température, humidité, rayonnement solaire...). Chung et al. ([Chung06], [Chung09]), proposent un benchmark énergétique basé sur une approche d'analyse régressive afin de prendre en compte d'autres paramètres comme les degrés heures de climatisation ou la nature de l'enveloppe...

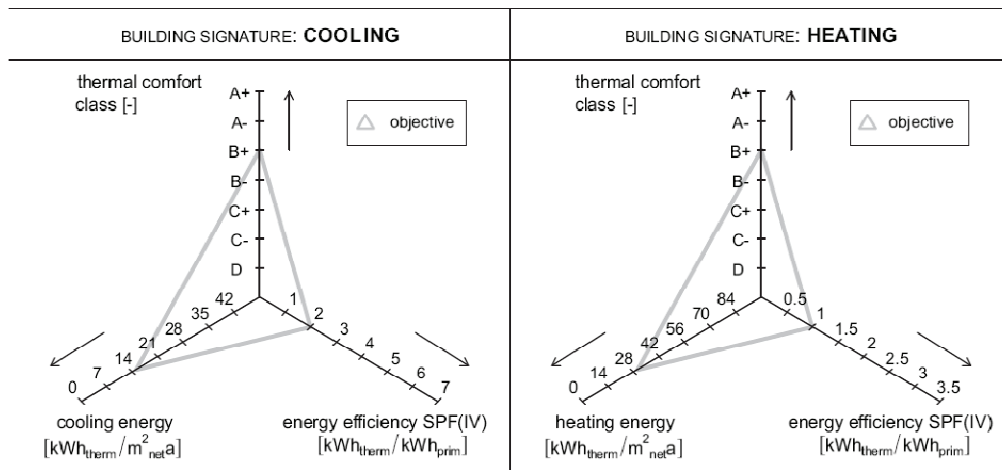


Figure 3-3 Extrait de [Kalz10]

Une dernière approche de représentation d'un benchmark repose sur l'analyse des composants principaux, qui se nomme en anglais « principal component analysis » [Gaitani10]. La méthode mathématique consiste à dé-corréler les variables sensibles de l'index au moyen de variables indépendantes. Le benchmark comprend alors un vecteur regroupant les variables indépendantes et une matrice de passage reliant ce vecteur aux variables quantifiables.

### 3.1.5 Synthèse des exemples

A travers les différents exemples précédents, nous avons illustré que de nombreux paramètres peuvent être pris en compte. Les règles de conception utilisées, l'occupation du bâtiment, les caractéristiques spécifiques des bâtiments, de l'usage ou bien encore des équipements, sont des éléments qui peuvent varier fortement pour un secteur d'activité donné et ce, même pour une géométrie de bâtiment identique. Ainsi la mise au point de l'index demande de pouvoir offrir certains degrés de liberté afin de s'approcher le plus possible du bâtiment étudié. Il est donc nécessaire de définir une base de données, suffisamment consistante, pour repérer les informations typiques affectant les index de performance.

Par exemple, une base de données d'index peut être obtenue à partir d'un ensemble d'études paramétriques constituées par l'étude de :

- Plusieurs bâtiments types

- Plusieurs climats
- Etc...

Ces index paramétriques peuvent être élaborés à l'aide d'une population de bâtiments réels. Cependant l'utilisation d'un outil de simulation est également possible. Ainsi, la simulation de ces paramètres et de leurs influences peut permettre de définir une base de données d'indicateurs [Nikolaou09].

La précision de l'identification dépend étroitement de la similarité des conditions dans lesquelles des bâtiments / des équipements étudiés sont comparés avec celles utilisées pour formuler l'indicateur. Donc **la description de l'échantillon de référence est une donnée indispensable avant d'effectuer toute comparaison.**

Nous analysons plus en détail au paragraphe 3.4, l'étape préliminaire de l'analyse comparative : la **mise au point de l'indicateur de référence** d'une méthode de type benchmark.

Nous avons classifié une série d'articles utilisant la méthode de benchmark conformément au type, à la base de données utilisée, à la méthode de classement et à l'utilisation d'une analyse régressive. Le Tableau 3-3 reprend la synthèse de ces informations.

Référence	Type de benchmark	Base de donnée	Méthode de classement de performance	Analyse régressive	Index de comparaison
[Tscudi04]	Energétique	Expérimentale	Paramétrique	Unique	Partiel
[Dupont06]	Energétique	Expérimentale	Paramétrique	Unique	Partiel
[Philippin00]	Energétique	Expérimentale	Paramétrique	Unique	Global
[Chung06]	Energétique	Expérimentale	Paramétrique	Multiple	Global
[Chung09]	Energétique	Expérimentale	Paramétrique	Multiple	Global
[Lam10]	Energétique	Expérimentale	Paramétrique	Multiple	Global
[Nikolaou09]	Energétique	Simulations	Paramétrique	Unique	Global
[Lee09]	Indicatif	Expérimentale	Hybrid	Multiple	Global
[Hernandez08]	Energétique	Expérimentale & Simulations	Paramétrique	Unique	Partiel
[Liao04]	Indicatif	Simulations	Paramétrique	Unique	Partiel
[Kalz10]	Energétique et indicatif	Expérimentale	Paramétrique	Unique	Global
[Yik]	Energétique	Expérimentale & Simulations	Paramétrique	Unique	Global
[Gaitani10]	Energétique	Expérimentale	Paramétrique	Multiple	Global

*Tableau 3-3 Classification de différents benchmarks issus de la littérature*

Nous notons que les benchmarks reposant sur une méthode paramétrique peuvent s'appliquer à un niveau global ou à un niveau partiel et ce, pour quantifier la performance technique de l'installation.

La plupart des articles étudiés établissent préférentiellement un index global énergétique. Cependant nous pouvons noter que l'identification d'une opportunité particulière est alors délicate. En effet, comme nous l'avons illustré au chapitre 2, les causes d'inefficacité d'un système de climatisation sont multiples. Donc utiliser l'analyse d'un indicateur global énergétique (kWh/m<sup>2</sup>) ne peut pas conduire à identifier une opportunité individuelle. Par conséquent, il est nécessaire d'établir un ou plusieurs indicateurs pour chacune des opportunités et d'établir un lien individuel entre les causes et la valeur (ou respect d'un indicateur) de cet ou ces indicateurs. Ce lien causal représente le critère de détection de l'opportunité.

### 3.2 Méthodes de détection de défauts utilisées dans la maintenance

Nous rappelons que la maintenance d'une installation peut se décomposer en trois types d'actions (chapitre 1, paragraphe 1.10).

Le premier type correspond à une **action préventive**, c'est-à-dire à la mise en place d'une action pour empêcher l'occurrence d'un défaut, par exemple le nettoyage périodique d'un condenseur permet de maintenir périodiquement le niveau de performance de la machine de production.

Le deuxième type correspond à une **action corrective** c'est-à-dire à la mise en place d'une action pour supprimer la cause d'un défaut détecté. Par exemple un problème de confort dans certaines zones d'un bâtiment peut permettre de détecter un déséquilibre hydraulique du réseau d'eau, une procédure d'équilibrage permet alors de corriger le problème.

Le troisième type correspond à une **action curative**, c'est-à-dire à la mise en place d'une action pour supprimer le défaut détecté. Ce type d'action peut s'avérer temporairement efficace mais ne perdurera pas dans le temps. En effet, si le défaut intervient prématurément sur la durée de vie « normale » d'un équipement, il peut être envisageable de compléter ce type d'action par la mise en place d'une action corrective.

Nous examinons dans les parties suivantes les **méthodes d'identification** qu'une équipe de maintenance peut utiliser pour identifier les défauts de l'installation et donc certaines **opportunités énergétiques** du chapitre 2. Nous analysons également le lien entre la périodicité des actions préventives et la temporalité des deux autres types d'action.

#### 3.2.1 Le suivi dynamique de défaut, une méthode pour corriger le système ?

Le suivi dynamique de défaut consiste à utiliser un outil informatique, préalablement calibré par rapport à l'installation existante, pour produire une comparaison de paramètres observables, issus d'une campagne de mesures expérimentales, par rapport aux résultats obtenus par simulation.

Cette méthode peut s'appliquer à un niveau local sur certains composants comme un groupe de production d'eau glacée [Com02] ou encore une tour de refroidissement [Ahn01], une CTA [Hous01], un système monosplit à détente directe [Chen01]. Ces méthodes demandent la mise en place d'instrumentations spécifiques ou l'utilisation de compteurs ou sous-compteurs. Les données mesurées permettent de détecter la déviation de paramètres liés à un ou plusieurs défauts. Les défauts sont alors corrigés par la mise en place de solutions adaptées.

Différentes méthodes de détection dynamique de défauts sont répertoriées dans [Kels05].

Dans la méthodologie générale de détection dynamique de défauts, une première phase d'identification est nécessaire. Celle-ci est effectuée au cours d'une phase de diagnostic ; elle s'établit par la modification des paramètres d'un modèle jusqu'à ce que les variables de sortie coïncident avec les variables de sortie du système réel c'est-à-dire qu'un calibrage du modèle est effectué. Les différences de valeur de paramètres servent alors d'indicateur sur l'ampleur du défaut. Un ensemble d'équations permettent alors de diagnostiquer l'installation comme dans [Hous01]. Un apprentissage du modèle peut être effectué à l'aide des entrées du système réel déjà optimisé, à l'aide d'un réseau de neurones par exemple dans [Morisot00].

La détection dynamique de défauts va permettre de quantifier dans la phase d'usage du bâtiment, des écarts de fonctionnement par rapport à un état de référence. Donc les défauts déjà présents au moment de la mise en place ne seront pas détectables si la situation de référence n'est pas clairement définie.



Le calibrage du modèle réalisé in-situ sur l'installation peut permettre, par son intégration dans la partie opérative d'une gestion technique du bâtiment (GTB) ou bien directement intégré dans la machine de production [CARRIER09], de détecter et de diagnostiquer automatiquement certains défauts. Ces algorithmes sont le résultat de recherches sur la sensibilité des paramètres physiques mesurables associés aux différents défauts constatés. Des niveaux de criticité sont définis afin de déclencher des alarmes et ainsi de prévenir le personnel afin de corriger le problème.

NOM ALARME	DESCRIPTION ALARME	ACTION RÉALISÉE PAR LE CONTRÔLE	TYPE DE RÉARMEMENT	CAUSE PROBABLE
Défaut compresseur A1	L'entrée de sécurité du moteur s'est ouverte en raison d'une protection de surchauffe compresseur	Le compresseur est arrêté	Manuel	Surchauffe compresseur
Défaut thermistance sortie eau évaporateur	Thermistance hors plage	L'unité est arrêtée	Automatique si la température mesurée par le capteur revient à la normale	Thermistance défectueuse
Défaut basse pression circuit A	Circuit en fonctionnement et pression d'aspiration sous seuil autorisé	Le circuit est arrêté	Automatique lorsque la pression redevient normale et si le même défaut n'a pas eu lieu le même jour (machine équipée d'une carte "CCN/clock"). Sinon manuel	Manque de réfrigérant, filtre obstrué ou capteur de pression défectueux
Défaut haute pression circuit A	Circuit en fonctionnement et pression de refoulement dépassent le point de déclenchement haute pression	Le circuit est arrêté	Automatique lorsque la pression redevient normale et si le même défaut n'a pas eu lieu le même jour (machine équipée d'une carte CCN/Clock. Sinon manuel. Eventuellement, le pressostat haute pression doit être réarmé.	Défaut circuit ventilateur, température de l'air ou du condenseur trop élevée
Pressostat haute pression non réarmé ou rotation inverse compresseur circuit A	Le pressostat haute pression n'a pas été réarmé suite à un déclenchement de haute pression ou, l'un des compresseurs du circuit fonctionne en rotation inverse	Id ci-dessus	Manuel. Eventuellement, le pressostat haute pression doit être réarmé.	Le pressostat haute pression n'a pas été réarmé, mauvaise connexion électrique compresseur
Protection gel échangeur à eau	Le capteur de température d'eau d'entrée ou sortie échangeur à air est au-dessous du point de déclenchement gel	L'unité est arrêtée	Automatique si la même alarme n'a pas été déclenchée le même jour (machine équipée d'une carte "CCN/ clock"). Sinon manuel	Manque de débit d'eau ou thermistance défectueuse
Délestages répétés basse température d'aspiration échangeur à air circuit A	Plus de 6 délestages successifs de capacité de circuit en raison de basse température d'aspiration	Le circuit est arrêté	Manuel	Capteur pression défectueux, filtre bouché ou manque de charge réfrigérant

*Tableau 3-4 Alarmes intégrées dans un GPEG [CARRIER09]*

Dans [CARRIER09], la plupart des alarmes constatées entraînent un arrêt immédiat du groupe de production. En effet, les causes probables de ces défauts peuvent à leur tour entraîner des réparations beaucoup plus lourdes, et de ce fait un coût de réparation plus important par la mise en place d'une action curative. Ce point est soulevé dans [Breuker99], où les auteurs précisent qu'une perte lente de réfrigérant ou un encrassement de l'échangeur conduit souvent à une rupture prématurée de certains composants. L'intérêt est alors double pour le fabricant, en période de garantie les pièces à remplacer sont peu coûteuses, en période hors garantie le client peu gagner sa confiance si les coûts de réparation sont réduits.

Dans ce qui précède, nous avons présenté une approche utilisant des moyens techniques d'instrumentation important. Cependant toute cette instrumentation peut se révéler coûteuse pour la maintenance de petites installations. Les équipes de maintenance doivent donc avoir d'autres méthodes pour détecter les défauts.

## 3.2.2 Un suivi régulier de l'installation pour la détection de défauts ?

L'élaboration de règles permettant d'associer des paramètres observables sont implicitement définies dans l'approche précédente. En effet des règles dites « expertes » ont été élaborées afin de lier un défaut à des paramètres observables. Donc l'utilisation de ces règles « expertes » permet une identification des causes. Cette identification s'appuie donc sur l'analyse d'un certain nombre d'indicateurs mesurables (puissance, pression, température,...) ou d'indicateurs visuels.

Par exemple certains défauts entraînent directement une surconsommation du groupe de production [Com02]. Le tableau ci-dessous reprend les résultats de cette étude.

Défaut	Puissance
Débit d'eau réduit au condenseur	++
Débit d'eau réduit à l'évaporateur	+
Fuite de réfrigérant	-
Surcharge de réfrigérant	++
Excès d'huile	++
Encrassement du condenseur	++
Présence d'incondensables dans le circuit frigorifique	+++
Vanne de détente defectueuse	+

Tableau 3-5 Tendence d'évolution de la puissance électrique pour le diagnostic [Com02]

Un autre exemple est celui d'un arbre des causes réalisé dans [Bory08] à la Figure 3-4.

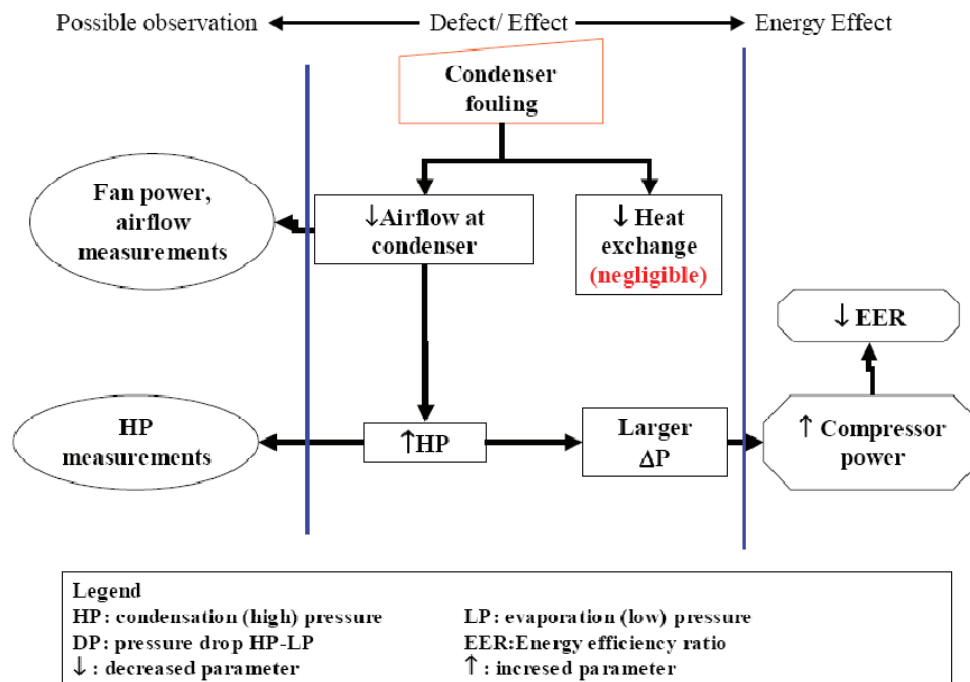


Figure 3-4 Représentation causale d'un encrassement du condenseur côté air et des paramètres d'observation [Bory08]

Ainsi un suivi régulier de ces paramètres doit permettre d'identifier des défauts. Toutefois la fiabilité des conclusions obtenues peuvent être contestable si les conditions expérimentales ne correspondent pas aux conditions des précédentes mesures.

D'autre part, un suivi temporel des actions curatives permet de formuler des **indicateurs statistiques** qui peuvent aider à déterminer un scénario de périodicité pour la mise en place d'une action préventive. On citera parmi les indicateurs les plus courants :

- Le temps moyen entre deux actions curatives le « Mean Time Between Failure » (MTBF)
- Le temps moyen nécessaire à une action curative « Mean Time To Repair » (MTR)

En effet si une action curative apparaît à une fréquence régulière on peut imaginer remplacer le composant fautif préventivement surtout si d'autres parties sont indirectement touchées par le défaut initial. Ces indicateurs statistiques pour les équipements de traitement d'air sont proposés dans [Hale01].



### 3.2.3 De la correction à la prévention

Comme nous l'avons évoqué en 3.2.2, afin de réduire les coûts relatifs au suivi et à la maintenance de petites installations, il est envisageable d'effectuer certaines actions périodiques préventives.

En effet, les groupes de production les plus importants sont souvent mis en place dans une structure où une équipe de maintenance qualifiée peut intervenir à tout moment pour réarmer le système, et rendant donc l'indisponibilité du matériel de climatisation restreint. Tandis que dans le cas de petites installations, si aucune équipe ne peut intervenir rapidement, le système peut continuer de fonctionner au détriment de la consommation et être réparé ultérieurement si la présence du défaut n'altère pas le confort des occupants. Ainsi, les plus petites unités qui ne sont pas équipées d'instrumentations embarquées devraient être vérifiées périodiquement.

Afin d'illustrer la transition entre la prévention et la correction, nous proposons d'examiner la méthodologie développée dans [Bory08]. Cette méthode permet de quantifier des problèmes que les principaux systèmes de climatisation rencontrent pendant leur vie. La première étape permet d'élaborer qualitativement l'impact de la présence d'un défaut. Cette étape est celle explicitée au paragraphe 3.2.2 et illustrée à la Figure 3-5. La deuxième étape permet la quantification statique d'un défaut à l'aide d'études de sensibilité. Elle permet de formuler quels sont les paramètres à contrôler pour détecter le défaut. La troisième étape permet de valider le modèle proposé à l'aide de résultats tirés de la littérature. La quatrième étape permet de coupler le modèle à un fichier climatique et un modèle de bâtiment. Cette étape est utilisée pour déterminer l'évolution de l'impact énergétique de la présence d'un défaut. Enfin, une dernière étape est utilisée pour proposer des scénarios d'actions préventives : une analyse coût-bénéfice est utilisée pour tirer des conclusions sur la périodicité optimale des actions préventives afin d'assurer un maximum d'économie d'énergie.

Ces différentes étapes sont reprises dans la Figure 3-5.

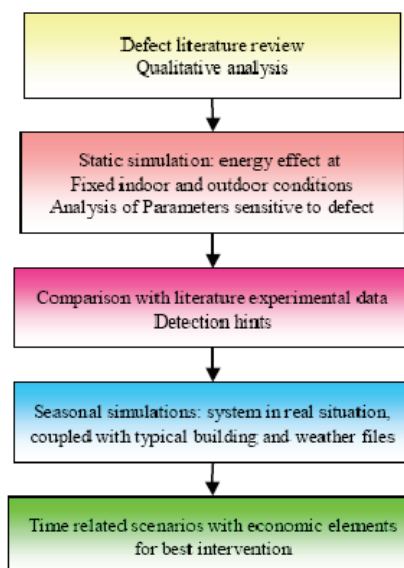


Figure 3-5 Méthodologie générale de simulation de défauts [Bory08]

Afin de réaliser les étapes 2 et 4 il est nécessaire de construire un benchmark réalisé à partir d'un ensemble de simulations. Dans [Bory08], trois types de bâtiment, deux climats et deux types de systèmes ont été étudiées.

L'**optimum** obtenu est une valeur moyenne de la périodicité, il pourrait être utilisé afin de formuler un référentiel de périodicité d'une action préventive à l'exploitant ou au manager.

### 3.2.4 Exemple de procédure simplifiée d'identification de défaut de maintenance

Dans ce paragraphe nous voulons illustrer l'application de méthode d'identification d'un défaut de maintenance. Pour cela nous avons pris l'exemple d'un encrassement côté air du condenseur d'un groupe de production d'eau glacée. Pour réaliser une procédure d'identification nous devons :

- Rechercher les effets d'un défaut sur des indicateurs qui peuvent être mesurés, visualisés ou trouvés dans la documentation technique. Nous avons répertorié trois mesures possibles (pressions de fonctionnement de la machine, différentiel de pression sur l'air, puissance du ventilateur) et une constatation visuelle. Pour chacun de ces indicateurs nous avons qualitativement décrit leur variation
- Mettre en relation le défaut avec les différents effets et causes constatés sur les indicateurs
- Rechercher les opportunités énergétiques associées au défaut. Dans notre cas l'opportunité associée est le nettoyage du condenseur (ECO O3.17)

A ce stade du travail, nous avons représenté schématiquement l'analyse effectuée (Figure 3-6). Dans cette figure, nous avons ajouté un critère pour décider ou non de la mise en place de l'opportunité. Ce critère doit être établi en fonction de l'évaluation du gain.

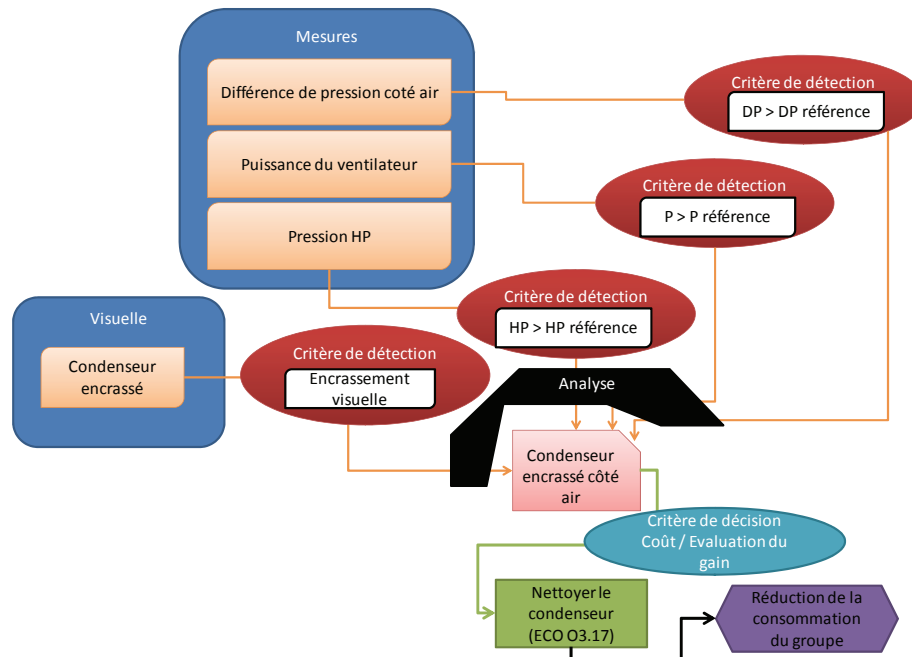


Figure 3-6 Procédure complète d'identification de l'ECO O3.17

Dans cette figure, nous avons fait apparaître une étape d'analyse. Cette analyse est basée sur un ensemble de « règles expertes » permettant d'identifier précisément cette opportunité. Par exemple, la pression HP élevée peut être due à une surcharge de fluide frigorigère. Il est donc nécessaire d'effectuer cette étape à la fois pour simplifier la récupération de données et permettre de maîtriser le diagnostic.

Nous notons que la technicité de certaines mesures peut être coûteuse et délicate à effectuer si aucune instrumentation embarquée n'est disponible. De plus leur interprétation peut être difficile pour un inspecteur néophyte. Il convient également de pouvoir définir les grandeurs de référence en l'absence de la documentation technique.

Il est donc nécessaire de sélectionner les indicateurs pertinents permettant de détecter le défaut en prenant en compte la facilité de définir une référence, le coût humain et

technique associé. Nous proposons donc de simplifier la procédure de détection par celle présentée à la Figure 3-7.

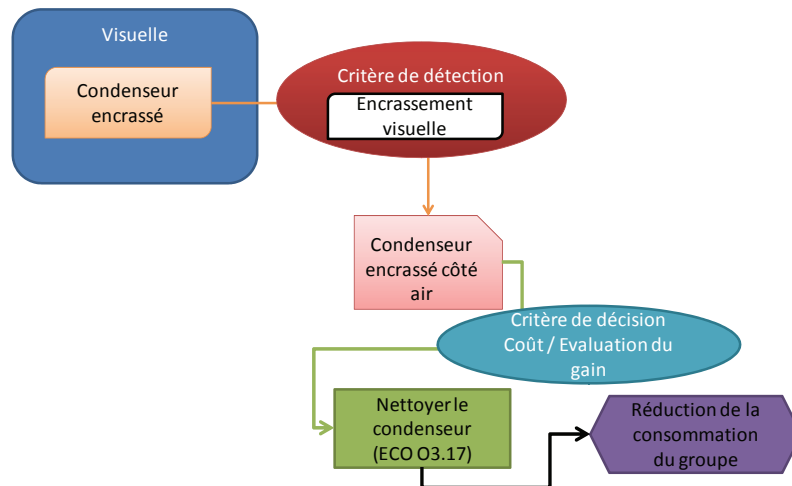


Figure 3-7 Procédure d'identification simplifiée de l'ECO O3.17

### 3.2.5 Synthèse des méthodologies de détection de défauts de maintenance

Après avoir établi un ensemble de règles, une recherche causale est utilisée afin d'identifier les conséquences d'un défaut de maintenance de l'installation.

Dans ce cadre, la détection dynamique de défauts permet de détecter et de diagnostiquer « automatiquement » les défauts afin de mettre en place des actions curatives et correctives. Cependant elle requiert une instrumentation importante qui peut être intégrée dans différentes parties opératives du système.

De la même manière, un suivi régulier de l'installation permet également de diagnostiquer l'installation et donc de détecter des défauts de maintenance.

Mais ces deux méthodes de détection de défaut utilisées s'appuient sur une méthode de d'analyse des causes et des effets. Cette dernière méthodologie est à examiner selon sa temporalité :

- **Une détection Causes-Effets statique** : le suivi régulier de paramètres permet de détecter à l'aide d'**indicateurs** des déviations et de rechercher ce qui en est la cause afin d'identifier une opportunité énergétique.
- **Une détection Causes-Effets dynamique** : le suivi en temps réel de paramètres permet de détecter des déviations à l'aide d'**indicateurs** et de rechercher ce qui en est la cause afin d'identifier une opportunité énergétique.

Une méthode de récupération de données complète cette méthodologie afin de la rendre applicable sur le terrain. De plus, il est nécessaire de définir un référentiel de valeur pour chacun des indicateurs de détection.

D'autre part, une méthodologie de benchmarking peut permettre de formuler un indicateur de périodicité d'actions préventives. Il pourrait être intégré aux outils utilisés par les sociétés d'exploitation dans les logiciels de Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO).

A travers la construction d'une procédure de détection, nous avons également souligné l'importance des moyens techniques et humains nécessaires à l'identification d'une opportunité en fonction de la disponibilité des informations (mesures de référence)

### 3.3 L'inspection normative des installations

Une inspection d'un système de climatisation est élaborée au sens de la norme [EN15240] :

- par l'examen de la documentation pertinente relative à la conception du système,
- par des vérifications visuelles des équipements,
- par des vérifications des réglages du système et des paramètres de régulation,
- par des méthodes de **mesures optionnelles**.

#### 3.3.1 L'inspection visuelle des installations : une méthode d'identification d'opportunités ?

Ces vérifications visuelles sont formulées sous la forme d'une liste de points de contrôle, dont nous proposons un exemple simple dans le Tableau 3-6.

Points de contrôle de l'inspection	
Etat général de la maintenance	Satisfaisant / Insatisfaisant
Rapport de maintenance	Oui / Non
Propreté des filtres à air	Satisfaisant / Insatisfaisant
Isolation thermique (visuellement)	Satisfaisant / Insatisfaisant
Propreté des échangeurs	Satisfaisant / Insatisfaisant
Températures du réfrigérant	Satisfaisant / Insatisfaisant
Pressions du réfrigérant	Satisfaisant / Insatisfaisant
Fuite du réfrigérant	Oui / Non
Calibrage des capteurs	Oui / Non
Arrêt automatique de l'unité quand les fenêtres sont ouvertes	Oui / Non

Tableau 3-6 Exemple de points de contrôle d'une machine frigorifique

L'inspecteur doit répondre de façon binaire à ces points de contrôle lors d'une visite sur site.

A elle seule, cette liste de points de contrôle ne peut permettre à l'inspecteur que de constater des défauts d'entretien des équipements lesquels sont « *visuellement insatisfaisants* ».

Ces éléments doivent être mis en relation avec des pistes d'amélioration. Pour répondre à cette problématique, il est nécessaire de mettre en relation ces observations visuelles avec certaines opportunités que nous avons présentées brièvement au chapitre 2.

Afin d'identifier ces opportunités, l'inspecteur pourra s'appuyer sur les deux méthodologies précédentes. Par exemple en recherchant les causes des défauts observés (paragraphe 3.2.2) ou bien encore s'appuyer sur un benchmark afin de définir si les équipements utilisés sont ceux de la « **meilleure classe de performance** ».

Cependant, **cette approche reste une approche qualitative**. Elle ne permet pas à elle seule de quantifier des économies d'énergie.

#### 3.3.2 L'inspection documentaire : une méthode d'identification d'opportunités ?

L'inspection documentaire consiste à comprendre et analyser les différentes informations relatives à l'architecture et au dimensionnement de l'installation. Certaines de ces informations techniques peuvent être regroupées dans le dossier des ouvrages exécutés (D.O.E.).

Au chapitre 1, nous avons élaboré un ensemble de règles à respecter. L'analyse de ces règles nous a permis d'identifier certaines opportunités énergétiques du chapitre 2.

De plus, nous avons mis en évidence que certaines opportunités du chapitre 2 peuvent être identifiées si la « **meilleure efficacité technique** » n'a pas été mise en place. Cet

examen de la documentation existante peut donc permettre d'identifier certaines opportunités. Cependant il est nécessaire d'utiliser une méthode pour identifier cette « **meilleure pratique** ».

En l'absence de toute information concernant la performance du matériel ou la conception, il peut être nécessaire de récupérer ces informations sur le terrain sans quoi les opportunités associées ne pourront pas être identifiées.

Nous avons mis en évidence, au chapitre 2, que le non respect des règles de l'art pouvait être une cause d'inefficacité. Nous noterons que nous avons donc utilisé implicitement la **méthodologie de recherche causale** pour identifier des opportunités énergétiques.

### 3.3.3 L'inspection technique des réglages et des paramètres de régulation : une méthode d'identification d'opportunités ?

L'inspection des réglages et des paramètres de régulation consiste à identifier sur le terrain ces réglages et paramètres pour les comparer aux différentes règles que nous avons évoquées au chapitre 1.

Ces règles sont donc des benchmarks. Sans établir cette « **échelle de référence** » nous ne pourrions pas appliquer cette méthodologie d'inspection.

Par exemple, il peut être nécessaire d'examiner si une bande morte est bien utilisée (cf. chapitre 1, paragraphe 1.2.2).

### 3.3.4 La méthode de mesure

Des compteurs de temps de fonctionnement et des compteurs d'énergie peuvent avoir été mis en place dans un bâtiment. Cette information peut être utilisée pour déterminer si l'usage de l'équipement est « **cohérent** » avec le type d'usage du bâtiment. Sans la définition de cette cohérence nous ne pouvons pas appliquer cette méthode de mesures.

### 3.3.5 Synthèse de la méthodologie d'inspection

Nous notons que ces méthodologies ne peuvent pas être appliquées isolément. L'inspection relève donc plus d'une **méthodologie de récupération de données** que d'une méthodologie d'identification de défauts ou d'améliorations.

Pourtant nous avons également montré que celle-ci a un intérêt si elle est améliorée.

En effet elle permet de récupérer des indicateurs essentiels dans l'identification des causes d'inefficacité.

Nous avons mis en évidence que la méthode d'inspection visuelle pourrait permettre d'identifier les défauts d'entretien. L'inspection documentaire pourrait permettre d'analyser « **la conformité** » des informations techniques avec des « **règles de dimensionnement et d'exploitation** », mais également pourrait permettre d'identifier si la « **meilleure efficacité technique** » a été mise en place. L'inspection technique des réglages et des paramètres de régulation pourrait permettre de vérifier si les règles d'exploitation sont appliquées conformément « **aux règles de l'art** ».

L'utilisation de la méthodologie d'inspection réglementaire pourrait donc permettre de compléter la **méthode Causes-Effets statique** en utilisant les indicateurs récupérés in-situ. Ainsi, cette méthode améliorée permettra d'identifier les causes d'inefficacité en **s'appuyant sur la définition de références**.

### 3.4 Formalisation de référentiels pour l'identification

Dans les méthodologies précédentes, nous avons implicitement introduit la notion de référentiels.

Les méthodologies de détection de défauts de maintenance doivent s'appuyer sur le fonctionnement « *standard* » d'un équipement pour permettre d'utiliser une détection causale.

La méthodologie d'inspection documentaire doit s'appuyer sur la notion de dimensionnement « *adéquat* » et sur les informations permettant de connaître la « *meilleure efficacité technique* ».

La méthode d'inspection des paramètres et réglages doit s'appuyer sur la « *conformité* » de la mise en service avec le cahier des charges de conception mais également sur la « *conformité* » avec la « *bonne pratique* » des règles d'exploitation.

La méthodologie d'inspection visuelle doit au moins s'appuyer sur un « référentiel visuel » spécifiant le fonctionnement / entretien normal d'un équipement. Pour rendre quantitative cette méthode, nous suggérons de la compléter par une méthodologie d'identification causale.

La méthodologie de benchmark doit s'appuyer sur une « *échelle de performance* » de solutions techniques.

La méthodologie de benchmark peut être utilisée pour créer ces références et ainsi permettre d'identifier une opportunité. Cette méthodologie peut alors amener à identifier des améliorations des équipements, du bâtiment, du système de régulation et du commissionnement. Indirectement, elle permet également de définir une référence nécessaire à la détection causale.

Nous proposons donc d'analyser plus en détail la méthodologie de benchmark.

#### 3.4.1 Construction d'une classification à partir d'une méthodologie de benchmarking

L'analyse effectuée dans la méthodologie de benchmark est basée sur une comparaison d'un index de référence à un index obtenu in-situ. Pour réaliser cette analyse il existe plusieurs stratégies. Ainsi l'index de référence peut être formulé en utilisant trois critères :

- Un critère de **représentativité** de l'existant
- Un critère **consensuel**, par exemple une valeur définie dans une norme comme [EN15232], dans un label comme [Eurovent], dans une réglementation comme [RT2005] ou [Certif09], ou bien en définissant des règles de l'art de conception ou d'exploitation standardisées.
- Un critère permettant de représenter **la performance maximale atteignable** technologiquement

Une échelle de performance peut ensuite être élaborée à partir de ces trois critères. Par exemple, des étiquettes de performance énergétique sont disponibles afin de pouvoir comparer la performance énergétique d'appareils ou de bâtiments comme le DPE. Les classes de performance énergétique peuvent être au sens de la norme EN15217 [EN15217], établies à l'aide de deux performances de référence, l'une liée à la réglementation thermique en vigueur et l'autre au niveau de performance atteinte par environ 50 % du parc immobilier national.

Ainsi l'utilisation d'index de référence permet de mettre en place une échelle de performance. Il est donc évident que ce classement permet d'identifier qualitativement :

- Si l'index de performance investiguée est conforme à celui de l'existant
- Si l'index de performance investigué atteint les critères consensuels



- Si l'index de performance peut tendre vers un optimum et ce en fonction du coût

Comme il existe de nombreuses disparités entre les bâtiments il convient de pouvoir définir une base de référence permettant la comparaison d'indicateurs comparables. Des outils d'analyse plus ou moins performants ont été développés pour produire des bases de données d'index :

- Une méthode paramétrique, nous parlerons dans ce cas de benchmark paramétrique.
- Une méthode non paramétrique. Nous parlerons dans ce cas de benchmark non paramétrique.

Ces deux variantes se distinguent par la détermination des frontières d'efficience. La méthode paramétrique suppose un modèle déterministe ou stochastique qui se base sur une « tendance centrale » alors que la méthode non paramétrique repose sur la recherche de la frontière par les extrêmes en séparant « l'efficacité purement technique » de l'efficacité managériale [Lee09] [Lee10].

Dans ce travail nous limitons le cadre de notre étude à l'identification d'économies d'énergie portant sur la liste que nous avons proposée au chapitre 2. Ainsi nous écartons de notre étude les méthodes non-paramétriques.

### 3.4.2 Construction d'un benchmark numérique

L'élaboration d'un benchmark paramétrique s'effectue selon les étapes suivantes :

- De mettre au point une base de données constituant les caractéristiques de la population, cette base de données sera utilisée pour définir les particularités des bâtiments étudiées. Cette base de données est constituée pour mettre en évidence la sélection des facteurs ayant un impact potentiellement sensible sur le ou les indicateurs de performance
- D'effectuer des études de sensibilité de ces facteurs sur le ou les indicateurs de performance.
- De sélectionner un ou plusieurs facteurs ayant un impact significatif sur l'indicateur de performance et de créer une base de données d'indicateur(s) de performance en fonction de cette sélection.

La base de données de l'index permet alors de définir la référence à atteindre :

- Un indicateur « moyen », représentatif de l'existant
- Un indicateur « optimal », représentatif de la meilleure performance atteignable
- Un indicateur « consensuellement » sélectionné

La description de la base de données peut être fastidieuse et difficile à définir pour une étude expérimentale et de surcroît à un niveau global compte tenu du nombre important de paramètres influençant l'index de performance. De plus, peu de propriétaires se sentent concernés par la gestion des documents relatifs à leur bâtiment ce qui peut rendre l'analyse paramétrique peu fiable. Toutefois, la simulation de plusieurs bâtiments typiques peut constituer un moyen plus rapide à mettre en place si une base de données fournissant les caractéristiques de l'enveloppe et des équipements existe [Nikolaou09].

### 3.4.3 Sélection des paramètres

La sélection des paramètres sensibles reste une étape basée sur l'expertise de l'utilisateur de la méthode. Cette sélection de paramètres peut être rapprochée de celle examinée dans la réunion d'éléments quantifiables : l'agrégation. Dans le domaine énergétique, l'agrégation est principalement utilisée dans les études de maîtrise de la demande d'électricité par les compagnies électriques. Ainsi, une estimation de la

réponse d'un parc permet à ces sociétés d'optimiser la production. Les principaux modèles d'agrégation sont présentés dans [Orphelin99].

Dans son travail, [Orphelin99] reprend la classification de [Chan80] pour séparer en deux catégories les causes de diversité :

- **Les facteurs de diversité spatiale.** Ceux-ci permettent de constituer des groupes homogènes c'est-à-dire des catégories de bâtiments regroupant des paramètres comparables. Ces facteurs seront sélectionnés pour leur invariance au sein d'un groupe homogène. Les propriétés thermiques de l'enveloppe ou encore la surface sont des exemples de diversité spatiale.
- **Les facteurs de diversité temporelle** sont à considérer pour l'étude des paramètres influençant l'agrégation d'une variable au sein d'un groupe homogène. Ces facteurs seront sélectionnés pour la variation aléatoire de certains paramètres. Les conditions météorologiques réelles ou bien encore le comportement des occupants sont des exemples majeurs de diversité temporelle. Un exemple de ce type de facteur est le foisonnement des charges thermiques d'un bâtiment.

Dans notre démarche, nous proposons que la mise au point de benchmark prenne en compte les deux points suivants :

- Les facteurs de diversité servant à définir l'échantillon de la population visée par le benchmarking, c'est-à-dire permettant de définir les groupes homogènes de la population ciblée. Nous distinguons les **facteurs de diversité du parc immobilier** et les **facteurs de diversité technique** des équipements.
- Les **facteurs de différenciation** servant à différencier un bâtiment / système au sein d'un groupe homogène. Ceux-ci permettent de définir les études de sensibilité du benchmark. Par exemple l'usage et les conditions climatiques peuvent être des facteurs de différenciation.



### 3.5 Synthèse des différentes méthodologies d'identification

La première approche est celle de l'utilisation d'une méthodologie de benchmark dont nous explicitons la formulation au paragraphe 3.1. Nous avons remarqué que celui-ci peut permettre d'analyser un protocole de maintenance au paragraphe 3.2.2. Mais, nous le verrons, son usage permet également de faire évoluer la structuration d'un contrat de performance énergétique à l'aide d'une estimation statistique de l'économie d'énergie (paragraphe 4.2.3).

La deuxième méthode consiste à détecter, à l'aide d'un suivi régulier ou continu de l'installation, des actions correctives de maintenance (3.2.1 et 3.2.2). Cette méthode de détection est donc une méthode reposant sur la recherche de causes et des effets que nous appelons une recherche causale (statique ou dynamique).

A travers la troisième approche (partie 3.3), nous avons montré qu'une inspection normative, quelle qu'elle soit, est une méthode qui pourrait permettre d'identifier des causes d'inefficacité. Cependant, en l'état actuel, ce n'est pas plus qu'un protocole de récupération de données.

Nous rappelons que l'identification des opportunités requiert la mise au point d'un référentiel : d'une part pour définir le fonctionnement « *standard* » d'un équipement, la « *conformité* » de la mise en service avec le cahier des charges de conception, et d'autre part pour définir un dimensionnement « adéquat », ou bien encore réaliser une « *échelle* » de performance de solutions techniques. La méthodologie de benchmark peut ainsi être utilisée pour créer cette référence et permettre d'identifier une opportunité. Ainsi cette méthodologie peut amener à directement identifier des améliorations des équipements, du bâtiment, du système de régulation et du commissionnement. Indirectement, elle permet de définir une référence nécessaire à la détection causale.

En s'appuyant tout d'abord sur la recherche des causes et des effets, il est possible de rechercher un ou plusieurs indicateurs pertinents. Il est alors nécessaire de relier les causes aux différentes opportunités du chapitre 2 et donc de faire le lien avec ces indicateurs. La référence de chacun des indicateurs est alors déterminée en sélectionnant un des trois types de critères que nous avons identifiés au paragraphe 3.4.1. Puis si cet indicateur est numérique, il est possible de nous appuyer sur les éléments présentés aux paragraphes 3.4.2 et 3.4.3 pour calculer un indicateur de référence. Un protocole de récupération de données est alors défini afin d'évaluer in-situ le ou les indicateurs pertinents.

La comparaison d'un ou plusieurs indicateurs obtenus in-situ à un ou aux indicateurs de référence permet alors d'identifier une unique opportunité. Cette unicité doit être obtenue à l'aide de la sélection pertinente des indicateurs pendant l'analyse des causes et des effets.

Nous proposons de compléter cette démarche en la combinant à une méthodologie d'évaluation afin d'obtenir une méthode d'identification d'économies d'énergie.

## Chapitre 4 Méthodes et procédures d'évaluation des économies d'énergie

Dans ce chapitre, nous proposons tout d'abord d'examiner la notion de référentiel d'économies d'énergies. Cette notion repose sur l'évaluation de la consommation pour deux phases d'un projet d'amélioration.

Puis, nous proposons de présenter différentes méthodes d'évaluation de la consommation qu'un inspecteur / un auditeur peut utiliser en fonction de la phase du projet d'amélioration. Ces méthodes viennent compléter celles que nous avons développées au chapitre 3 pour identifier des pistes d'amélioration. La combinaison des méthodes d'identification et des méthodes d'évaluation doit alors nous permettre de formuler des procédures d'identification d'économies d'énergie (Figure 4-1).

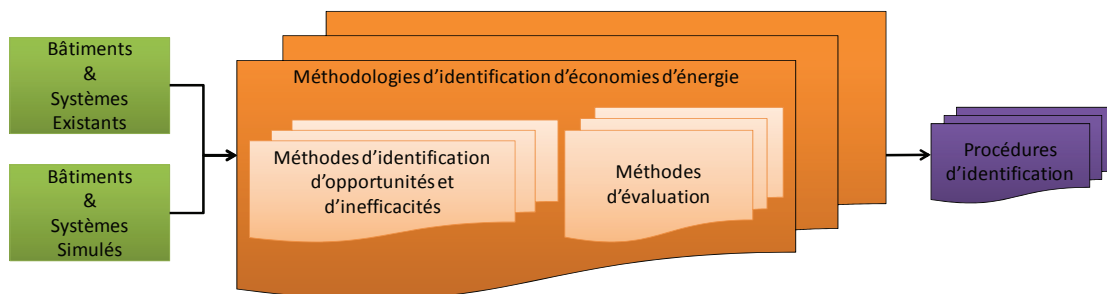


Figure 4-1 Méthodologies d'identification d'opportunités et d'évaluation d'économie

Afin de rechercher ce lien, nous proposons ensuite d'examiner les services énergétiques utilisés pour évaluer et garantir l'économie d'énergie. Nous décrivons les différentes techniques d'évaluation que des sociétés peuvent mettre en œuvre pour garantir les économies d'énergie. Nous soulignerons que ces techniques doivent être sélectionnées en fonction des caractéristiques des améliorations du projet.

Afin de rendre l'application des méthodes d'identification et d'évaluation réalisables, nous nous appuyons sur ces services énergétiques pour proposer un cadre procédural d'évaluation de la consommation en deux étapes. Ce cadre permettra de structurer le travail de l'inspecteur / l'auditeur.

Nous verrons que dans le cadre d'une garantie d'économie, l'utilisation des méthodes d'évaluation de la consommation permet d'élaborer différents contenus de procédures en fonction du coût et de la précision escomptée. Nous pourrions ainsi proposer différentes procédures applicables par un inspecteur en fonction du coût et de la précision mais également des caractéristiques des améliorations du projet.

## 4.1 Méthodes d'évaluation des économies d'énergie

### 4.1.1 Définition d'un référentiel pour les économies d'énergie

Le calcul des économies d'un projet d'amélioration requiert de définir deux périodes pour lesquelles la consommation doit être évaluée. Ces périodes sont la période de référence du projet d'amélioration et la période post-modernisation (appelée encore période de suivi).

Les économies d'énergie réalisées après la réalisation du projet sont évaluées de la manière suivante [IPMVP07] :

$$\begin{aligned} \text{Economies d'énergie} \\ &= \text{consommation (période référence)} \\ &- \text{consommation (période post - modernisation)} \pm \text{ajustements} \end{aligned}$$

Les ajustements ramènent la consommation d'énergie pour chacune des deux périodes du projet d'amélioration au même ensemble de conditions.

Deux méthodes d'ajustement peuvent être citées [Duplessis08] :

- La méthode des **consommations évitées**. Cette méthode repose sur la comparaison de l'évaluation de la consommation du bâtiment si aucune amélioration n'est apportée pendant la période de suivi à la mesure de l'énergie consommée durant la période de suivi.
- La méthode des **consommations normalisées**. Cette méthode consiste à comparer une évaluation de la consommation pendant la période de référence à la consommation de la période de suivi qui est évaluée pour les mêmes conditions opératoires.

Dans la suite de notre travail, nous nommerons la période de référence : la période pré-modernisation du projet ; et la période de suivi la période post-modernisation<sup>9</sup>.

Il est nécessaire de rechercher des méthodes d'évaluation qui peuvent être utilisées pour évaluer les différents termes de l'équation précédente.

### 4.1.2 Recherche de méthodes pour évaluer les économies d'énergie

L'approche développée dans la norme européenne de calcul des consommations [EN15603] permet de hiérarchiser la procédure d'évaluation quantitative de la consommation énergétique d'un bâtiment. Nous proposons d'utiliser et de compléter cette approche pour évaluer les économies d'énergie. L'évaluation de la consommation peut être calculée de quatre façons :

- Une **évaluation mesurée**
- Une **évaluation calculée**, basée sur des données standardisées. Ces paramètres sont des **hypothèses de calcul**, ils ne prennent pas en compte les nombreuses spécificités d'un système / bâtiment particulier.
- Une **évaluation calculée et corrigée** à l'aide de données liées au climat, à l'occupation et à l'environnement, adaptées au bâtiment réel et à l'objectif du calcul. Ces paramètres sont **estimés le plus qualitativement possible**.
- Une **évaluation calculée et calibrée** à l'aide de données liées au climat, à l'occupation et à l'environnement, adaptées au bâtiment réel et à l'objectif du calcul. Ces paramètres sont **évalués quantitativement** afin de prendre en compte les spécificités du bâtiment.

<sup>9</sup> Notons que chacune des deux périodes doivent permettre de représenter un cycle complet de fonctionnement d'un équipement.

Dans les trois dernières approches, la consommation de climatisation est évaluée en partant du besoin thermique du bâtiment et en remontant vers les postes consommateurs d'énergie (Figure 4-2). A chaque étape, les évaluations sont obtenues en spécifiant des **hypothèses** de calcul, ou / et en **estimant** des données mesurables ou / et à partir des **mesures disponibles**.

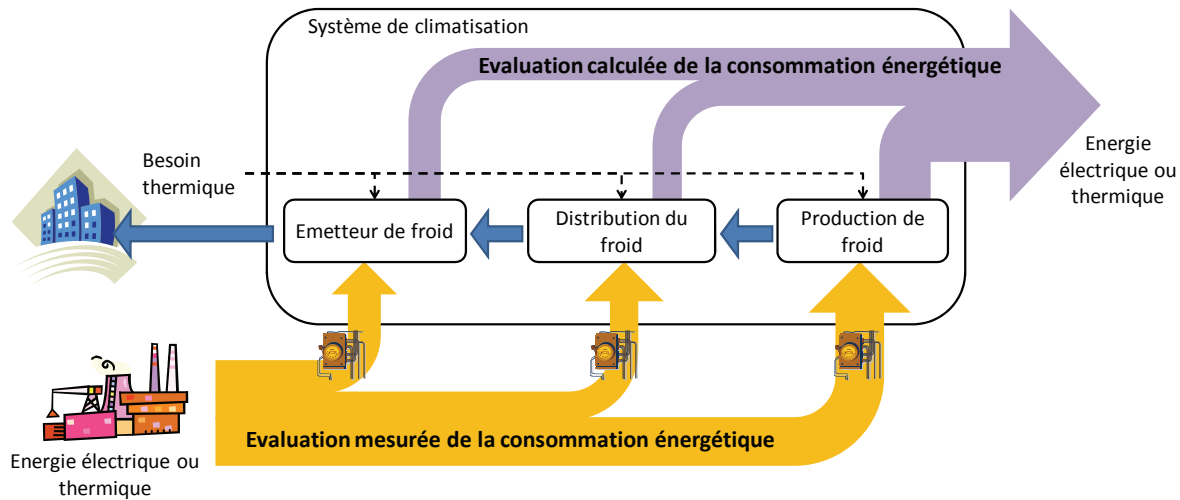


Figure 4-2 Consommation mesurée et calculée

Les deux méthodes d'ajustement du paragraphe 4.1.1 sont donc des méthodes combinant à la fois une méthode d'évaluation mesurée et une méthode d'évaluation calculée qui peut être corrigée (Tableau 4-1).

		Méthode d'évaluation	
		Evaluation mesurée	Evaluation calculée (et corrigée / calibrée)
Méthode d'ajustement	Consommation normalisée	Post modernisation	Pré modernisation
	Consommation évitée	Pré modernisation	Pré / post modernisation

Tableau 4-1 Sélection d'une méthode d'évaluation en fonction de la méthode d'ajustement et de la phase du projet

Notons que pour la méthode des consommations normalisées, la consommation pendant la période pré-modernisation peut être évaluée par une mesure ou par un calcul.

Nous proposons d'analyser plus en détail les méthodes d'évaluation calculées. Dans les parties 3.1 et 3.2, nous avons montré qu'il existe trois types d'évaluation calculées qui peuvent être utilisées par les praticiens afin de déterminer une estimation de la consommation et donc des économies potentielles :

- Les **méthodes d'évaluation basées sur des ratios**
- Les **méthodes d'évaluation statiques**
- Les **méthodes d'évaluation dynamiques**

Nous développons brièvement ces trois méthodes d'évaluation calculée dans les paragraphes suivants.

#### 4.1.3 Méthodes d'évaluation basées sur des ratios

Ces premières méthodes d'évaluation consistent à estimer la consommation à partir de ratios représentant la consommation normalisée par la surface.

Ces évaluations sont simples et rapides d'utilisation mais reposent sur un nombre de données important pour rendre fiable leur utilisation. Un exemple de base de données de ratios est proposé par exemple dans [Inspection française] ou encore dans [Dupont06] afin de juger le dimensionnement de l'installation. Partant de ce ratio, il est alors nécessaire de trouver une relation explicative entre la consommation et ce ratio.

Les outils utilisés peuvent être produits à l'aide d'une base de données statistique à l'aide d'une méthode de benchmark mesurée ou simulée.

Les entrées des outils doivent rester aussi **qualitatives** que possible<sup>10</sup> (comme une zone géographique, le type d'usage du bâtiment, ...) pour que leurs utilisations restent simples.

### 4.1.4 Méthodes d'évaluation statiques

Ces méthodes d'évaluation consistent à **formuler des corrélations** pour estimer la consommation. Ces corrélations peuvent être produites à partir d'un benchmark paramétrique mesuré ou simulé.

Une **méthode « bin »** peut également être utilisée pour évaluer statiquement sa consommation. Par exemple, à l'échelle d'un moteur, la méthode « bin » consiste à décomposer le temps de fonctionnement total en « bin » (intervalles) correspondant à différentes charges partielles. Un modèle de rendement du moteur permet alors de reconstituer une évaluation de la consommation.

La signature énergétique d'un bâtiment est une corrélation qui permet de mettre en relation le besoin thermique et le climat. Les degrés-jour et degrés-heure sont des indicateurs généralement employés afin de corréler le coefficient de transfert thermique de l'enveloppe du bâtiment avec le besoin thermique. Une relation explicative permet alors de relier le besoin thermique avec la consommation. Dans ce cas c'est une relation entre rendement de la machine de production et le besoin qui est utilisé afin d'estimer la consommation énergétique.

Notons que les outils développés dans le cadre de ces méthodes peuvent permettre de formuler des outils ensuite utilisés dans les méthodes d'évaluation basées sur des ratios.

### 4.1.5 Méthodes d'évaluation dynamiques

Le troisième type de méthode d'évaluation consiste à utiliser un outil de simulation prenant en compte des paramètres supplémentaires. Ces paramètres doivent rendre compte d'une part de la variabilité du besoin thermique via l'interaction de l'occupant et d'autre part de la variabilité de la réponse dynamique du système via son intégration dans le bâtiment.

Ainsi, une évaluation dynamique calcule, pour un pas de temps donné, l'intégrale du bilan de chaleur analogue à celui que nous avons explicité au chapitre 1, paragraphe 1.4.4.2. Cette évaluation permet donc de discrétiser cette intégrale en fonction du temps.

Ces évaluations reprennent les éléments déployés pour formuler un benchmark paramétrique simulé mais également les éléments de la détection dynamique de défaut de maintenance.

Notons que les outils et modèles développés dans le cadre de ces méthodes peuvent permettre de formuler des méthodes d'évaluation statiques.

---

<sup>10</sup> Ces informations qualitatives peuvent être complétées par une estimation ou une mesure de la surface, de la puissance nominale d'un équipement,...

## 4.1.6 Sélection d'une méthode d'évaluation

Il est essentiel de sélectionner la méthode appropriée par rapport à son utilisation, à sa précision et au niveau de connaissance de l'utilisateur ou bien encore du nombre d'entrées du modèle.

Cette analyse a été effectuée dans [ASHRAEF97]. Nous limitons notre tableau de synthèse aux méthodes utilisées pour le calcul d'économies d'énergie et le complétons en ajoutant les entrées et la possibilité de corrections / calibrage (Tableau 4-2).

Type de méthode	Basée sur des ratios	Statique	Dynamique
Difficulté d'utilisation	Faible	Moyenne	Elevée
Précision escomptée	Faible	Moyenne	Elevée
Nombre d'entrées	Faible	Moyen	Elevé
Type d'entrées	Qualitative	Quatitative	Quatitative
Correction possible	✓	✓	✓
Calibrage possible		✓	✓

Tableau 4-2 Comparaison des méthodes d'évaluation

Ainsi, plus la méthode demande un nombre important de paramètres, plus l'utilisateur doit avoir un niveau de connaissance important et plus la précision sur l'estimation devrait être importante. Mais la précision sur l'estimation de la consommation est relative à la précision des paramètres d'entrée.

Les différentes méthodes d'évaluation calculées peuvent être complétées par une modification des données d'entrée par rapport à certaines valeurs obtenues sur le terrain (qualitativement ou quantitativement). Cette phase de correction, voire de calibrage, permet d'augmenter la précision de l'estimation de l'économie d'énergie.

Pour élaborer des procédures d'évaluation d'économie d'énergie, une société de service énergétique peut s'appuyer sur ces trois types de méthodes. Nous analysons dans le paragraphe suivant la méthodologie employée pour garantir des économies d'énergie.

## 4.2 Les services énergétiques, une évaluation garantie de l'économie d'énergie ?

En vue d'évaluer des économies d'énergie (réelles), une société de service énergétique doit tout d'abord analyser un bâtiment et un système existant. Dans cette analyse elle doit identifier les éléments à améliorer et chiffrer un potentiel d'économie d'énergie. Elle doit ensuite le contractualiser, puis vérifier que les économies d'énergie réalisées après la réalisation du projet correspondent à l'objectif contractuel ajusté. Nous reprenons ces différentes étapes sur la Figure 4-3.

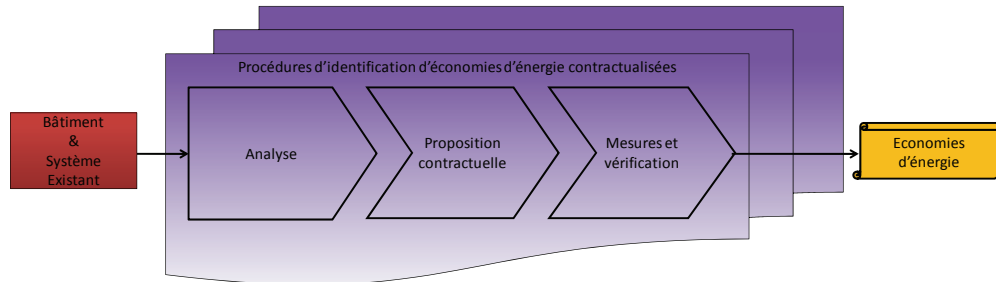


Figure 4-3 Les services énergétiques un exemple de procédure d'identification

### 4.2.1 Structuration procédurale d'un service énergétique

La disponibilité de données techniques (relevés expérimentaux, informations techniques...) est une entrée primordiale dans la démarche de contractualisation de l'économie d'énergie pour le bénéfice du prestataire. En effet, plus le nombre disponible de données techniques pertinentes est important, plus les moyens humains et techniques à mettre en œuvre vont être réduits afin d'analyser la performance actuelle du bâtiment et des systèmes.

L'analyse peut donc s'effectuer en deux étapes successives si les données requises pour l'estimation sont réduites. Une analyse préliminaire est alors nécessaire afin de cibler la mise au point d'un protocole de récupération de données techniques et expérimentales. A l'issue de cette analyse préliminaire, une première estimation de l'économie d'énergie potentielle peut être envisagée en faisant un certain nombre d'hypothèses. Ensuite lors de l'analyse complémentaire, certaines de ces hypothèses peuvent être remises en cause et ainsi modifier l'estimation précédente (Figure 4-4).

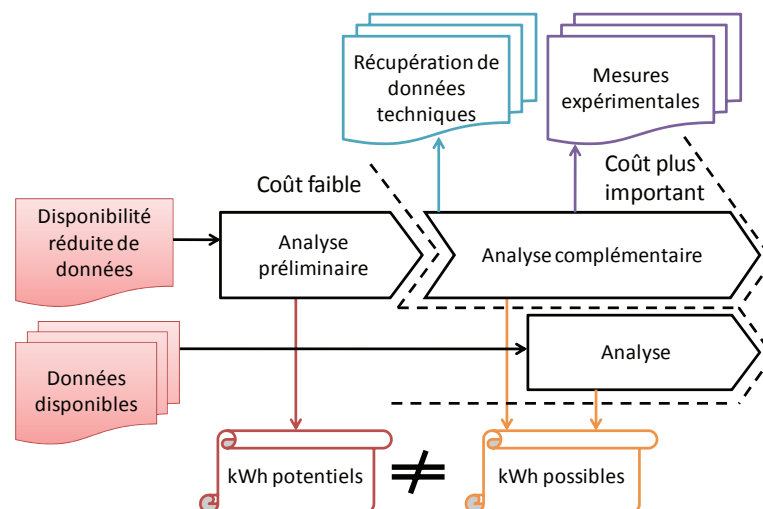


Figure 4-4 L'analyse des informations



A l'issue de cet ensemble d'analyses, la société fait une proposition contractuelle au maître d'œuvre. Ce contrat doit faire apparaître au sens de [PrEN15900] :

- La définition de la consommation de référence et des facteurs d'ajustement
- La proposition de mise en place d'actions
- Un chiffrage de l'amélioration de l'efficacité attendue et si celle-ci est garantie
- Les obligations et les responsabilités de chacune des parties
- La méthode de vérification
- Un calendrier fixant les délais pour chacun des quatre points précédents

Comme nous l'avons indiqué sur la Figure 4-4, l'estimation des économies d'énergie est différente selon les étapes de mise place du service.

Lors de l'analyse préliminaire, une disponibilité de données réduite requiert des méthodes d'évaluation au nombre limité d'entrées.

Lors de l'analyse complémentaire ou si la disponibilité des données est importante, des méthodes d'évaluation plus précises peuvent être utilisées ce qui accroît le coût du service énergétique.

La proposition contractuelle d'économies d'énergie doit prendre en compte de différentes incertitudes. Celles-ci sont liées à l'utilisation du matériel de mesure ou bien encore liées à l'utilisation d'une méthodologie d'évaluation d'économie d'énergie. La proposition contractuelle d'économie d'énergie devrait donc être inférieure à l'économie évaluée. Ainsi, plus les incertitudes sont limitées, plus le prestataire pourra garantir le résultat en augmentant sa marge car le risque financier diminuera.

Si des mesures expérimentales ont été nécessaires lors de la phase d'analyse, il est envisageable que ces mêmes mesures soient réalisées ultérieurement dans les procédures d'enregistrement et de suivi afin de vérifier l'économie d'énergie.

Enfin, la procédure déployée afin de mesurer la consommation réelle doit permettre de l'ajuster afin de vérifier l'économie d'énergie contractuelle (Figure 4-5).

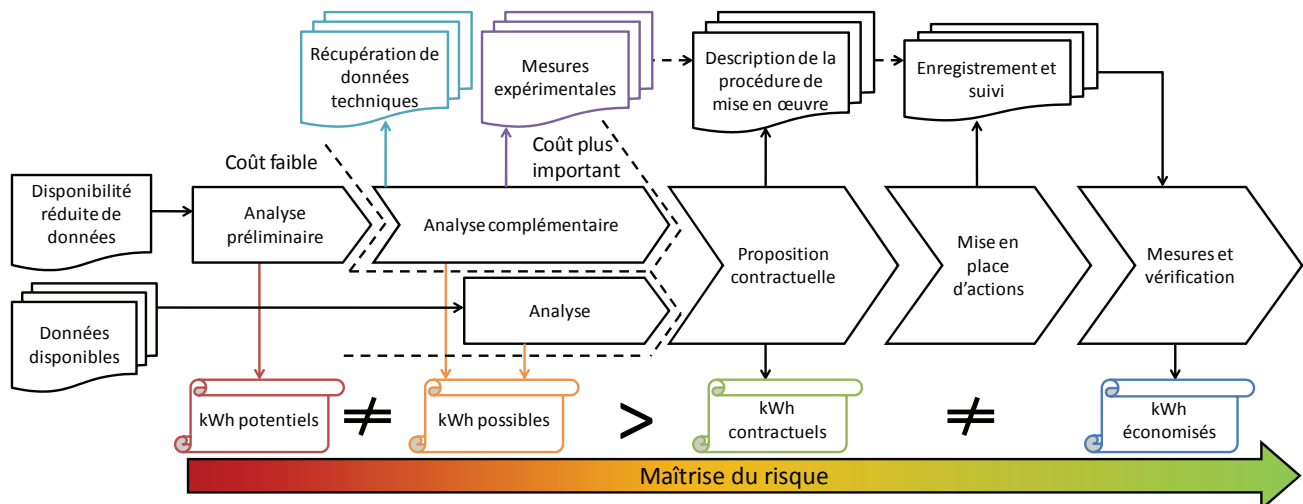


Figure 4-5 Les étapes de mise en place d'un service énergétique

Dans les paragraphes suivants, nous examinons plus en détail comment sont réalisées ces différentes étapes.



#### 4.2.2 Sélection d'une technique d'évaluation en fonction des caractéristiques du projet d'amélioration

Comme nous l'avons évoqué au début de cette partie, la mise en place d'une contractualisation de l'économie générée nécessite d'augmenter la précision des économies d'énergie potentielles. Donc, dans le même temps, l'application de méthodes employées dans ce contexte doit permettre de justifier et sélectionner une technique d'évaluation adaptée au projet.

Dans ce cadre, les acteurs du secteur privé et les organismes publics ont élaboré un guide dit « Protocole International de Mesure et de Vérification de Performance » (PIMVP) [IPMVP07]. Ce recueil est avant tout utilisé pour mettre en place une terminologie commune aux clients, fournisseurs et financiers et d'établir les risques financiers pris par chacune des parties.

Ainsi, le PIMVP [IPMVP07] propose quatre techniques pour évaluer l'impact énergétique de solutions dans un bâtiment. Ces évaluations s'effectuent en deux temps, pendant la période pré-modernisation et pour la vérification post-modernisation.

Ce cadre méthodologique ne contient pas de procédures spécifiques, et encore moins pour le domaine que nous étudions dans lequel la gestion des installations apparaît comme un élément essentiel.

Il existe plusieurs techniques ou encore « options » permettant de définir des protocoles d'évaluation, les définitions de celles-ci sont extraites de [IPMVP07] :

- Pour l'option A, *« les économies sont déterminées par la mesure sur le terrain des paramètres de performance principaux qui définissent la consommation d'énergie des systèmes affectés par le projet d'amélioration. Le calcul de la consommation d'énergie de la base de référence et de la période de suivi est effectué à partir de mesures continues / à court terme des paramètres principaux de fonctionnement et de valeurs estimées. Des ajustements peuvent être exigés. Les calculs techniques sont donc effectués à partir d'hypothèses et/ou de mesures à court terme ou de façon continue. Cependant ces hypothèses ne peuvent être faites que s'il est possible de démontrer l'impact combiné des erreurs plausibles que peuvent entraîner toutes ces stipulations n'affecteront pas de façon significative les économies globales mesurables. »*
- Pour l'option B, *« les économies sont déterminées par la mesure sur le terrain de la consommation d'énergie des systèmes affectés par le projet d'amélioration. La fréquence de la mesure s'étend de court terme à continu, selon les variations prévues du paramètre mesuré, et de la longueur de la période de suivi. Le calcul des économies d'énergie s'effectue soit par la mesure à court terme ou en continu de la consommation de la période de référence et de la période de suivi soit par des calculs utilisant des mesures de consommation d'énergie. Les ajustements sont requis. »*
- Pour l'option C, *« les économies sont déterminées en mesurant la consommation d'énergie au niveau du site. Des mesures continues de la consommation sont effectuées durant la période de référence et la période de suivi. Le calcul des économies d'énergie s'effectue par l'analyse des données de la période de suivi et de la période de référence et ce en prenant en compte des ajustements (si requis). »*
- Pour l'option D, *« les économies sont déterminées par la simulation de la consommation. La simulation de la consommation d'énergie est calibrée avec les données horaires ou mensuelles. »*

La sélection d'une des options doit prendre en compte les caractéristiques du projet d'amélioration. Nous proposons de nous appuyer sur l'analyse effectuée dans

[Duplessis08], et ce pour nous permettre de juger pratiquement et sélectionner adéquatement une option de [IPMVP07]. Il nous est paru important de souligner les critères de sélection d'une technique par :

- La capacité à évaluer les économies d'un projet en définissant son périmètre d'évaluation. Le périmètre minimal d'évaluation porte sur un équipement particulier et le périmètre maximal porte sur l'ensemble du bâtiment. Bien entendu, entre ces deux périmètres, il est possible d'isoler, par exemple un ensemble d'équipements utilisé pour une fonction particulière du système.
- La capacité à prendre en compte des ajustements complexes. En effet, après avoir défini le périmètre d'évaluation, il est nécessaire de déterminer si l'impact de l'environnement extérieur peut et doit être considéré.
- La capacité à prendre en compte les effets d'interactions entre l'influence d'un projet d'amélioration sur les postes de consommation inclus dans le périmètre d'évaluation et l'influence que ces améliorations peuvent avoir sur les postes extérieurs au périmètre d'évaluation.

Le Tableau 4-3 reprend l'analyse effectuée dans [Duplessis08].

Caractéristiques du projet d'amélioration	Procédure d'évaluation			
	Option A	Option B	Option C	Option D
Capacité à évaluer les économies d'un projet d'amélioration particulier	Oui	Oui	Non	Oui
Capacité à prendre en compte les ajustements complexes	Modeste ou la performance du système évalué est peu sensible au fonctionnement	Oui	Modeste	Oui
Capacité à prendre en compte des effets interactifs complexes	Non ou effets interactifs limités ou ignorés	Non ou effets interactifs limités ou ignorés	Oui	Oui

Tableau 4-3 Caractéristiques d'un projet et de l'utilisation des options de [IPMVP07], adapté de [Duplessis08]

#### 4.2.3 La maîtrise du risque financier

Dans le cas où l'économie d'énergie est garantie par le prestataire, celui-ci doit stipuler dans le contrat le type de dédommagement qu'il devra consentir si son obligation n'est pas atteinte.

L'identification des principaux risques d'un projet énergétique permet de limiter une possible perte financière. L'analyse des différentes options de [IPMVP07] permet au prestataire de cibler le risque financier encouru pour chaque amélioration proposée en fonction de la technique d'évaluation.

Dans ce cadre, nous notons tout d'abord que « *le coût de la procédure d'évaluation des économies n'est pas pertinente si son coût représente 10% des gains espérés sur la facture énergétique* » [Duplessis08].

Le risque peut également être partagé entre une multitude de projets pour un type d'action. En réduisant le coût de l'analyse et en proposant un prix forfaitaire pour un type d'action, la société ayant réalisé préalablement des études statistiques sur d'anciens projets devrait achever avec succès la plupart de ses contrats et donc en moyenne créer un bénéfice. Dans ce cas, la société devrait tout de même faire appel à un organisme d'assurance.

### 4.3 Structure et contenu d'une procédure d'identification d'économie d'énergie

#### 4.3.1 Structure d'une procédure d'identification d'économie d'énergie

Dans notre démarche d'identification d'économie d'énergie, il est nécessaire de pouvoir proposer à l'auditeur (ou à l'inspecteur) des méthodes permettant de quantifier les économies réalisables. L'approche de la mise en place d'un service énergétique propose, à ce titre, l'ébauche d'une procédure en deux étapes : une analyse préliminaire et une analyse complémentaire. Nous proposons donc d'organiser notre procédure d'identification d'économies d'énergie en s'appuyant sur deux étapes : une analyse préliminaire permettant d'identifier et d'évaluer « grossièrement » des opportunités puis une analyse complémentaire pour évaluer « plus finement » une sélection d'opportunités.

Dans une première étape, l'inspecteur / l'auditeur doit tout d'abord identifier des opportunités énergétiques, puis évaluer une première fois les économies associées. Pour cela, il doit s'appuyer sur la méthodologie d'identification développée au chapitre 3. L'application de cette méthode permet de formuler un univers de données minimales requis pour l'identification d'un univers d'opportunités énergétiques.

Dans une seconde étape, l'inspecteur / l'auditeur doit évaluer les opportunités qu'il a identifiées. D'une part, il est nécessaire pour lui d'utiliser une méthode d'évaluation adaptée à la disponibilité des données. Il lui est donc nécessaire d'utiliser des méthodes dont les paramètres d'entrées sont définis dans un autre univers de données. Ces données devraient au minimum permettre d'évaluer l'impact de l'amélioration du poste sur lequel une amélioration est appliquée. Mais cet impact peut inclure une ou plusieurs fonctions du système (comme la production, la distribution, ..) ou un ou plusieurs équipements (le GPEG, les pompes...). D'autre part, même si les données sont suffisantes pour effectuer une évaluation précise d'une opportunité particulière, il peut décider d'utiliser la même méthode d'évaluation que pour les autres opportunités afin de limiter la première phase d'investigation.

Dans une troisième étape, l'inspecteur / l'auditeur peut sélectionner certaines des opportunités identifiées, en tenant compte du coût, des bénéfices, des informations déjà disponibles, de retours d'expérience,...

Dans une quatrième étape, l'incertitude des estimations peut ensuite être réduite en procédant à une analyse complémentaire. L'analyse complémentaire des solutions permet alors à l'auditeur d'analyser plus finement l'impact de la sélection d'opportunités.

Nous avons synthétisé ces différentes étapes à la Figure 4-6.

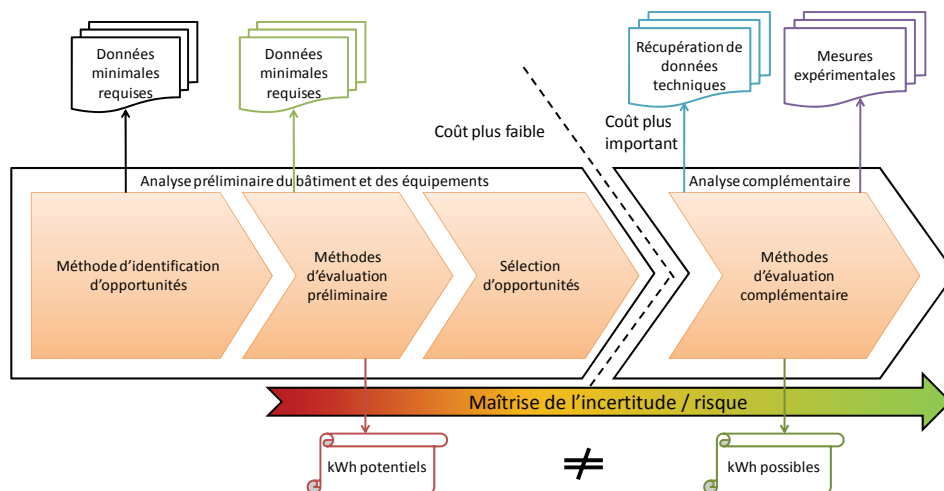


Figure 4-6 Structure de la procédure d'identification d'économie d'énergie

#### 4.3.2 Contenu des différentes étapes de la procédure d'identification des économies d'énergie

Nous proposons tout d'abord de rechercher une procédure de récupération des données minimales utilisées pendant l'analyse préliminaire. Les informations minimales de cette procédure doivent être sélectionnées en adéquation avec un univers d'opportunités potentiellement applicables pour le système étudié. Mais également, il est nécessaire de :

- Définir les données indispensables pour permettre l'identification des fonctions améliorables, puis des opportunités prises individuellement
- Définir les données indispensables pour permettre une évaluation de l'impact d'une amélioration individuelle sur le ou les postes de consommation

La limite du nombre de données de ces deux procédures peut être définie en supposant que les données minimales permettant d'identifier une opportunité sont celles permettant de l'évaluer à l'aide d'une méthode d'évaluation calculée. Il est donc nécessaire que nous recherchions un contenu plus précis de la procédure d'évaluation des opportunités prises individuellement.

Afin de réduire le temps et les moyens humains et techniques utilisés pendant l'évaluation préliminaire des opportunités, il est essentiel de :

- Limiter le nombre d'évaluations en ciblant les fonctions anormalement consommatrices
- Limiter la quantité totale d'informations de la procédure d'évaluation
- « Présélectionner » des opportunités en s'appuyant sur une analyse statistique des opportunités (fréquence de détection / gains potentiels)

Pour cibler la fonction pour laquelle l'inspecteur / l'auditeur doit rechercher des opportunités, la connaissance de la consommation des différents postes lui est indispensable. La mesure de la consommation globale peut s'obtenir à partir d'un relevé ou d'un suivi instrumenté de l'installation. Mais dans le cas de la somme de mesures de consommation spécifiques, la métrologie employée peut devenir rapidement plus coûteuse.

Pour limiter le nombre de données mesurées, l'inspecteur / l'auditeur peut faire un certain nombre d'hypothèses. Ces hypothèses peuvent prendre en compte un certain niveau d'ajustement des paramètres et des hypothèses sur les effets d'interaction des différents postes de consommation. Les méthodes calculées, quelles qu'elles soient, permettent d'intégrer cette double contrainte. Elles peuvent en effet permettre d'effectuer une première estimation des économies d'énergie des opportunités prises individuellement.

Notons que plus la quantité de données est importante pour effectuer l'analyse préliminaire, plus la quantité d'informations récupérée à partir des données techniques et des mesures expérimentales est limitée pour la phase d'analyse complémentaire.

#### 4.3.3 Contenu des procédures d'évaluation en fonction du coût, de la précision et des caractéristiques du projet

Afin de limiter le nombre de données pour une première évaluation des améliorations isolées, l'analyse préliminaire ne peut inclure que l'utilisation de méthodes calculées ou des méthodes calculées et corrigées. C'est-à-dire que les méthodes utilisées doivent être basées sur des données standardisées ou corrigées qualitativement. En effet, la calibration de ces méthodes est compromise du fait de leur coût humain et technique important.

Dans le but d'examiner le contenu d'une procédure d'évaluation, nous proposons d'examiner les différentes options de [IPMVP07]. En effet, en fonction de la phase du projet et de la méthode d'ajustement sélectionnée, les différentes options de [IPMVP07], peuvent faire appel à une méthode d'évaluation calculée de la consommation pour évaluer isolément une amélioration à l'aide des termes de l'équation du paragraphe 4.1.1 :

- L'option A est une technique qui utilise le calcul de la consommation. Cependant ce n'est pas une technique qui utilise une méthode calibrée au sens de notre définition (voir paragraphe 4.1.2). C'est donc une technique qui utilise une méthode d'évaluation calculée et corrigée.
- L'option B est une technique qui utilise le calcul de la consommation en effectuant la mesure de tous les paramètres utilisés dans le modèle d'évaluation. En ce sens, c'est une technique qui utilise une méthode d'évaluation de la consommation calculée et calibrée.
- L'option D est clairement une technique qui utilise une méthode d'évaluation calculée et calibrée.

Ainsi, les méthodes d'évaluation mises à disposition de l'inspecteur / de l'auditeur peuvent être examinées en regard de la démarche de garantie de l'économie d'énergie en fonction de la phase du projet d'amélioration et de la méthode d'ajustement sélectionnée. Nous proposons d'analyser ci-dessous ces relations pour une méthode d'ajustement des consommations évitées et pour la phase de pré-modernisation.

Pour les évaluations d'un projet par isolement des économies d'énergie, les techniques de l'option A, de l'option B ou de l'option D peuvent être utilisées avec les spécificités de chacune des options que nous venons d'énoncer. Nous venons donc d'établir un lien entre les techniques d'évaluation de [IPMVP07] et les méthodes d'évaluation du paragraphe 4.1.2.

Nous proposons maintenant d'établir le lien entre les méthodes d'évaluation et les caractéristiques du projet d'amélioration. Dans notre démarche par isolement, nous rappelons que les critères de sélection d'une option dépendent principalement de deux critères : la capacité à prendre en compte les ajustements et la capacité à prendre en compte les effets d'interactions. Compte tenu de la typologie que nous avons développée au paragraphe 4.1.2, nous proposons de mettre en relation ces capacités aux méthodes d'évaluation employées et ce dans le cadre de l'application d'une technique particulière.

Si les effets de l'environnement extérieur sont considérés peu sensibles<sup>11</sup> pour l'évaluation ou s'ils sont ignorés, il est possible d'utiliser une méthode calculée à partir d'informations standardisées. Lorsque les effets de l'environnement extérieur sur l'évaluation sont sensibles, une correction ou une calibration est alors envisageable et ce en fonction de la précision escomptée.

De plus, si les effets interactifs sont ignorés ou inexistants il est possible d'utiliser une méthode d'évaluation calculée. Si ces effets ont démontré un impact limité<sup>12</sup>, il est alors possible de corriger l'évaluation, puis, de quantifier ces effets afin de calibrer la méthode d'évaluation.

De la même manière, il est possible de mettre en regard les différentes techniques de [IPMVP07] pour une méthode d'ajustement des consommations évitées, en phase de post-modernisation. Les mesures partielles de la consommation sont optionnelles pour

---

<sup>11</sup> Par sensible, on entend que la valeur estimée ne varie pas de plus de 5% en valeur absolue pour la période pré / post modernisation considérée [Duplessis08]

<sup>12</sup> Par effets interactifs limités, cela signifie que l'amélioration à un impact sur un poste de consommation inférieur à 10% de l'amélioration globale sur la consommation du bâtiment [Duplessis08]

l'option A, obligatoire pour l'option B. Mais les mesures partielles peuvent être également obligatoires pour l'option D si l'évaluation de l'économie porte sur un ou plusieurs équipements.

En supposant que la méthode d'ajustement des consommations évitées est utilisée par l'inspecteur / l'auditeur durant la phase d'analyse complémentaire, il peut analyser tout d'abord les caractéristiques du projet d'amélioration, pour sélectionner une méthode d'évaluation et une technique de [IPMVP07].

La **précision escomptée de l'évaluation et le coût de mise en œuvre** (technique et humain) d'une procédure d'analyse peuvent alors servir de **contraintes** au travers desquelles il est possible de définir différentes procédures pour chacune des analyses. Nous rappelons (cf. paragraphe 4.2.3) que le coût total de l'analyse et du suivi ne devrait pas dépasser 10% de l'économie d'énergie dans le cadre d'une garantie. Cette limite pourrait être utilisée pour un cadre plus générale.

Nous avons synthétisé l'ensemble de ces informations dans le Tableau 4-4, en repérant qualitativement le coût humain et technique, et la précision escomptée de l'évaluation (le « +++ » représente le maximum et le « --- » le minimum).

		Approche par isolement du projet d'amélioration							
		Méthode d'évaluation calculée (données standardisées)			Méthode d'évaluation calculée et corrigée (prise en compte de paramètres qualitatifs)			Méthode d'évaluation calculée et calibrée (prise en compte de paramètres quantitatifs)	
		Méthode basée sur des ratios	Méthode statique	Méthode dynamique	Méthode basée sur des ratios	Méthode statique	Méthode dynamique	Méthode statique	Méthode dynamique
Technique d'évaluation	Option A	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
	Option B							✓	
	Option D								✓
Coût de mise en œuvre et connaissances requises		---	--	-	--	-	+	++	+++
Précision escomptée de l'évaluation		---	--	-	--	-	+	++	+++
Capacité à prendre en compte des ajustements complexes		Non ou la performance du système évalué est considérée peu sensible au fonctionnement			Modeste			Oui	Oui
Capacité à prendre en compte des effets interactifs complexes		Non ou effets interactifs ignorés	Non ou effets interactifs ignorés	Non ou effets interactifs ignorés	Non ou effets interactifs limités	Non ou effets interactifs limités	Non ou effets interactifs limités	Effets interactifs limités pouvant être mesurés	Oui
Phase d'analyse préliminaire		✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Phase d'analyse complémentaire					✓	✓	✓	✓	✓

Tableau 4-4 Sélection d'une méthode d'évaluation

Notons qu'en l'absence de paramètres mesurés, la méthode dynamique offre une large palette de possibilités pour les différentes techniques, mais requiert un niveau de connaissance de l'utilisateur et un nombre d'entrées plus important. Ce niveau de connaissance est accru si une identification des paramètres sensibles et des effets interactifs est réalisée.

Nous pouvons ainsi limiter le contenu du protocole de récupération de données pour les deux phases d'analyse en explicitant les limites d'utilisation et ce pour une approche par isolement<sup>13</sup> et pour une méthode d'ajustement des consommations évitées<sup>14</sup>.

<sup>13</sup> Pour une analyse complémentaire avec une approche globale, seule l'option C ou l'option D est possible. Pour l'option C, les caractéristiques du projet sont exposées au Tableau 4-3.

<sup>14</sup> Le même raisonnement peut être appliqué pour une méthode d'ajustement des consommations normalisées de la phase de pré-modernisation dans laquelle un calcul est utilisé pour cette phase de projet (voir paragraphe 4.1.2).



#### 4.4 Synthèse des méthodes d'évaluation des économies d'énergie

Dans ce chapitre, nous avons introduit une typologie de méthodes d'évaluation des économies d'énergie en fonction de la précision et du coût technique et humain.

Chacune des méthodes peut être mise en œuvre pour une phase spécifique d'un projet d'amélioration. La première phase est celle pendant laquelle un inspecteur ou un auditeur effectue une première évaluation des économies potentielles des solutions applicables au bâtiment et au système. Puis la deuxième phase représente la sélection des solutions les plus prometteuses. Enfin, pendant la troisième phase, il effectue une seconde évaluation de solutions sélectionnées<sup>15</sup>.

D'une part, la méthode d'évaluation dynamique apparaît comme une solution pouvant être utilisée à plusieurs niveaux de compétences et de coûts. D'autre part, cette dernière méthode permet de développer des méthodes simples et rapides d'utilisation. Ces dernières méthodes peuvent être utilisées, par exemple, pour une procédure de type « faible coût » et ce pour effectuer l'analyse préliminaire quel que soit l'objectif d'un service énergétique envisagée.

Dans notre travail, nous proposons d'aider au développement des services énergétiques quelle que soit la phase du projet d'amélioration. Nous proposons ainsi d'aider à la fois la mise en œuvre du mécanisme européen d'inspection réglementaire mais également d'appuyer les démarches des acteurs privés qui indirectement favorisent les investissements en faveur de l'efficacité.

Nous nous intéressons par conséquent, au chapitre 5, aux différentes techniques et aux modèles destinés à être utilisés dans les méthodes d'évaluation dynamique. Ces modèles et ces techniques sont présentés en réponses à certaines solutions que nous avons identifiées au chapitre 2. Nous nous attachons à les sélectionner pour qu'ils soient utilisables facilement par les praticiens.

---

<sup>15</sup> Dans le cas d'une garantie de l'économie d'énergie, l'inspecteur ou l'auditeur doit également mettre en œuvre un protocole de suivi et de vérification

## Chapitre 5 Sélection d'outils de modélisation pour l'évaluation des économies d'énergie

Nous avons fait remarquer au paragraphe 4.2.1 qu'il convient d'identifier l'impact des conditions influençant les économies. Deux types de modèles sont alors utilisables afin d'effectuer les ajustements de la consommation [Duplessis08] :

- **Les modèles de connaissances ou modèles directs** qui sont élaborés à l'aide d'une analyse des caractéristiques physiques d'un équipement ou du bâtiment afin de simuler son comportement.
- **Les modèles de comportement ou modèles inverses**, qui s'appuient sur une analyse statistique des relations d'interaction entre les paramètres et l'impact énergétique

Dans ce chapitre nous proposons de nous focaliser sur une sélection de modèles paramétrables facilement par les praticiens pendant une procédure d'identification d'économies d'énergie. Par conséquent, nous nous intéressons à décrire les **modèles directs**. Ceux-ci pourront être utilisés directement dans les **méthodes d'évaluation dynamique**.

Nous nous attachons tout d'abord à présenter les techniques de modélisation dynamique.

Puis nous analysons les modèles permettant de caractériser les transferts thermiques d'une zone en modélisant l'enveloppe du bâtiment.

Nous analysons ensuite deux outils de modélisation existants. Ces deux outils utilisent deux techniques de modélisation distinctes et deux types de modèle d'enveloppe distincts. Nous les comparons du point de vue d'un inspecteur / auditeur.

Enfin, nous exposons différents modèles pour :

- Modéliser le **système de régulation**
- Modéliser les **équipements** d'un système de climatisation à eau glacée

Même si ces derniers modèles sont destinés à être utilisés dans une méthode dynamique, il est possible d'envisager l'utilisation de certains d'entre eux pour une évaluation statique.



## 5.1 Techniques de modélisation pour une évaluation dynamique

Plusieurs outils de simulation sont disponibles pour modéliser le comportement thermique du bâtiment et des équipements techniques. Parmi les plus courants d'utilisation et les plus reconnus on peut citer la plateforme de simulation TRNSYS [TRNSYS], le logiciel DOE [DOE]. D'autres outils, moins connus, ont été développés par exemple ConsoClim [Consoclim], Simbad [Simbad] ou bien encore SimAudit [Simaudit] et Energy+ [EnergyPlus].

Ces outils apparaissent comme des outils modulaires permettant de traiter des cas variés. Certains d'entre eux permettent même en assemblant des composants de pouvoir traiter des cas quelconques [TRNSYS] [DOE].

Il existe deux techniques pour modéliser la consommation énergétique du bâtiment et de ses équipements :

- Une méthode reposant sur une estimation des besoins thermiques à l'aide d'un modèle de bâtiment. Un post-traitement permet ensuite d'utiliser cette information pour calculer la consommation d'un ou plusieurs équipements techniques. C'est une **approche séquentielle**.
- Une **approche reposant sur un couplage** du modèle de bâtiment et des équipements à chaque pas de temps de calcul.

Dans chaque famille il y a plusieurs niveaux de finesse. Les deux critères de sélection des modèles sont :

- La complexité du modèle : la précision attendue d'un modèle dépend du degré de complexité mise en œuvre, plus celui-ci est complexe plus la précision attendue devrait devenir importante.
- L'incertitude des paramètres : plus le modèle est complexe, plus le nombre de paramètres devient important, ce qui peut rendre le modèle peu fiable compte tenu de l'augmentation de l'incertitude des paramètres (Figure 5-1).

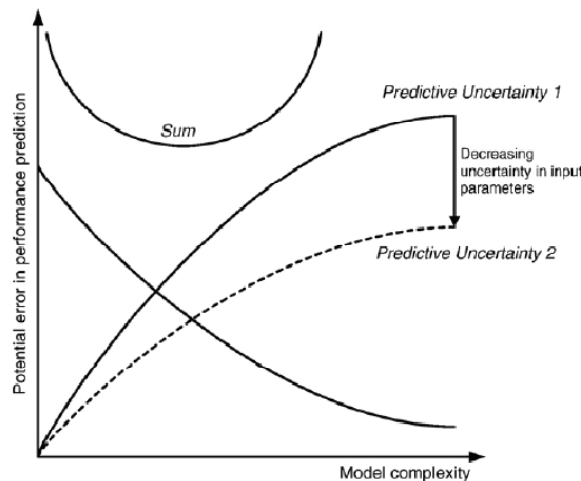


Figure 5-1 La complexité du modèle versus l'incertitude des paramètres [Trčka10]

Une fois la sélection de la technique de modélisation et le niveau de complexité du modèle effectuée, il est nécessaire d'établir une adéquation entre le pas de temps et l'objectif de la simulation : calcul de bilans énergétiques ou suivi réaliste du comportement dynamique d'un ou plusieurs composants de l'installation [Ouederni90].

Par exemple, dans le cas de bilans énergétiques, on peut se permettre des pas de temps relativement élevés (de l'ordre d'une heure).

## 5.2 Modélisation de l'enveloppe

Il existe deux approches pour modéliser les transferts thermiques à travers l'enveloppe d'un bâtiment :

- Les fonctions de transfert
- Un réseau résistance-capacité (R-C)

Ces deux approches permettent d'examiner l'impact de certaines améliorations techniques permettant de maîtriser le besoin thermique du bâtiment que nous avons introduit au chapitre 2 :

- L'installation de protections solaires (voir annexe 2, fiche ECO E1.2)
- Le contrôle des protections solaires (voir annexe 2, fiche ECO E1.3)
- Une amélioration de l'enveloppe par une isolation extérieure de la toiture (voir annexe 2, fiche ECO E3.2)
- L'utilisation de couleurs appropriés pour la façade (voir annexe 2, fiche ECO E4.2)
- L'utilisation d'équipements électriques basse consommation (voir annexe 2, fiche ECO E4.5 et fiche ECO E4.6)
- Une stratégie nocturne de ventilation (voir fiche ECO E2.1)

### 5.2.1 Modélisation par des fonctions de transfert

L'approche de modélisation par fonctions de transfert est largement diffusée dans la modélisation de la thermique du bâtiment. Cette approche consiste à analyser le transfert thermique en utilisant l'espace des nombres complexes. La transformée en Z (version discrète de la transformée de Laplace) est ainsi utilisée pour les modèles de simulation dont les entrées temporelles sont discrétisées.

Par exemple, la plateforme de simulation [TRNSYS] intègre un modèle d'enveloppe de bâtiment basé sur des fonctions de transfert. Les entrées de ce modèle sont facilement paramétrables à partir d'entrées physiques (épaisseur d'une couche, conductivité,...).

### 5.2.2 Modélisation par un réseau de résistances

Un exemple de réseau de résistances est proposé dans [Bertagnolio08] et nous sert de base pour la suite de ce travail.

Pour ce modèle mono-zone simplifié, le circuit R-C équivalent inclut cinq masses thermiques. Les parois opaques de l'enveloppe sont simulées avec réseau R-C du 1<sup>er</sup> ordre. Chacun de ces quatre réseaux admet comme condition aux limites soit un flux nul de chaleur (pour le sol et le plafond) soit une température imposée. La cinquième capacité est utilisée pour représenter l'inertie du mobilier et de l'air intérieur.

Chacun des réseaux R-C peut être élaboré d'une manière plus complexe pour prendre en compte d'autres phénomènes physiques comme le flux radiatifs ou les pertes par infrarouges.

Enfin des résistances uniques sont utilisées pour modéliser les apports par conduction des fenêtres et de l'apport sensible de l'air introduit et extrait par le système de ventilation mécanique et par infiltration.

Nous avons représenté schématiquement à la Figure 5-2, le réseau que nous avons utilisé.

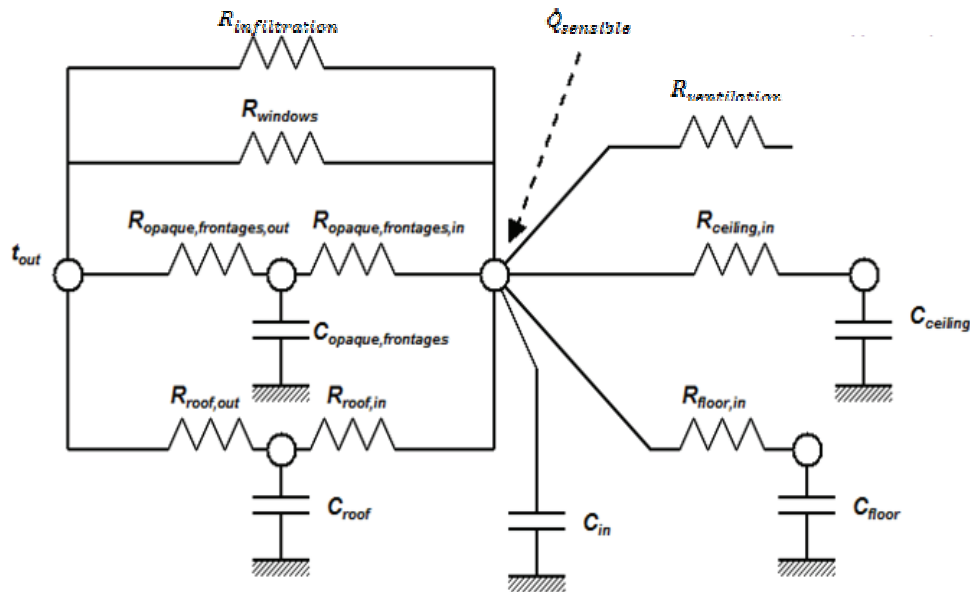


Figure 5-2 Réseau électrique analogue de l'enveloppe du bâtiment [Bertagnolio08]

Un bilan nodal permet alors de déterminer le besoin sensible de la zone en imposant la température du nœud central par la consigne de température intérieure. Nous avons repris schématiquement les apports thermiques de chacune des composantes intervenant dans le bilan thermique sensible du local<sup>16</sup>. Nous avons fait apparaître schématiquement à la Figure 5-3 :

- Les apports des parois opaques extérieures ( $\dot{Q}_{in}$ ) modélisés par le réseau R-C « opaque frontages » de la Figure 5-2
- Les apports de la toiture ( $\dot{Q}_{roof}$ ) modélisés par le réseau R-C « roof » de la Figure 5-2
- Les apports par conduction des fenêtres ( $\dot{Q}_{windows}$ ) modélisés par la résistance « windows » de la Figure 5-2
- Les apports du plancher ( $\dot{Q}_{floor}$ ) modélisés par la résistance « floor » de la Figure 5-2
- La chaleur libérée par le mobilier et l'air de la zone ( $\dot{Q}_{stock}$ ) modélisée par la capacité « in » de la Figure 5-2
- Le bilan de l'enthalpie sensible de l'air provenant de la ventilation mécanique ( $\dot{H}_{in\text{ mécanique}} - \dot{H}_{ex\text{ mécanique}}$ ) modélisé par la résistance « ventilation » de la Figure 5-2
- L'enthalpie sensible de l'air provenant des infiltrations, modélisée par la résistance « infiltration » de la Figure 5-2

Enfin un flux de chaleur est imposé au nœud de température de la zone avec la somme des apports sensibles ( $\dot{Q}_{sensible}$ ) de la Figure 5-2 et également représenté à la Figure 5-3 :

- Les apports internes dus à l'occupation, aux équipements de bureautique et à l'éclairage artificiel ( $\dot{Q}_{occ} + \dot{W}_{équipements} + \dot{W}_{light}$ )
- les apports du système de chauffage ( $\dot{Q}_{heating}$ ) et de refroidissement ( $-\dot{Q}_{cooling}$ )
- Les apports solaires transmis à travers les fenêtres ( $\dot{Q}_{sun}$ )

<sup>16</sup> Nous n'avons pas considéré de plafond dans notre exemple. Une méthode analogue peut être envisagée pour effectuer le bilan thermique total en ajoutant un bilan hydrique et latent.

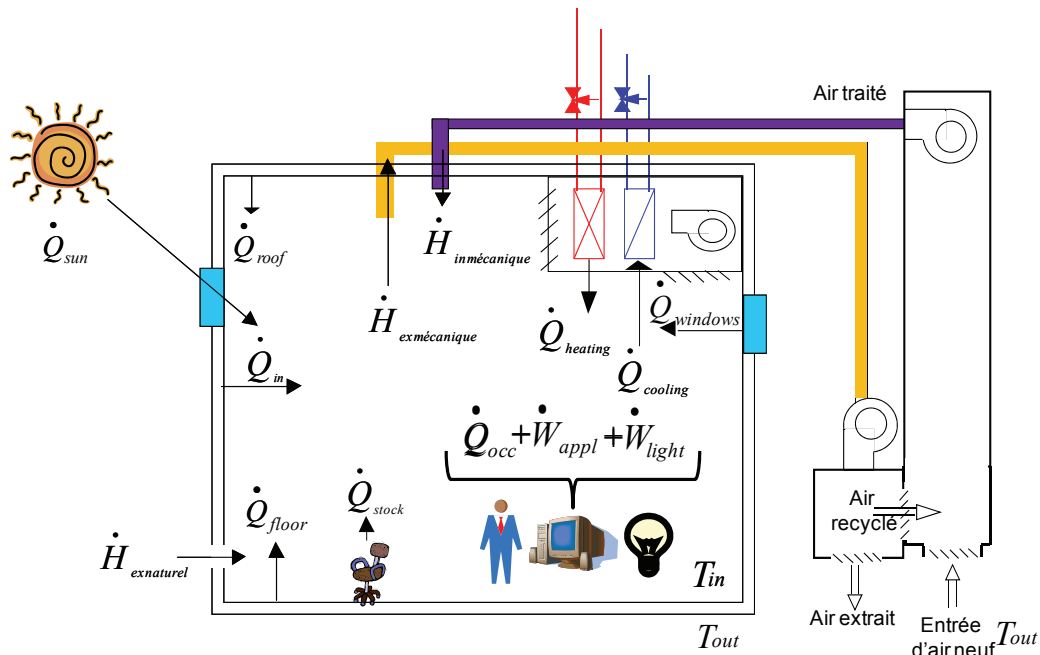


Figure 5-3 Exemple de bilan schématique de la zone

La résolution de ce bilan s'effectue à chaque pas de temps en considérant l'équilibre thermique de la zone. Un solveur d'équation peut être utilisé pour effectuer cette tâche.

Ce type de modèle d'enveloppe de bâtiment a été validé par comparaison avec la procédure BESTEST [Bertagnolio08]. Nous avons représenté un exemple des résultats à la Figure 5-4.

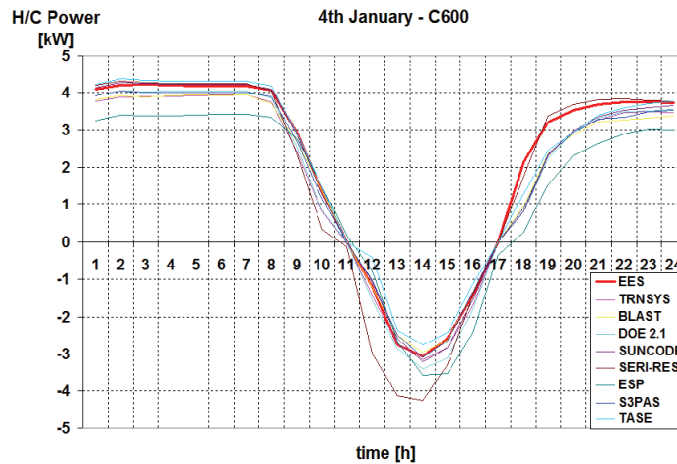


Figure 5-4 Exemple de résultat de la procédure BESTEST extrait de [Bertagnolio08]

### 5.3 Sélection d'un outil de modélisation dynamique

Nous avons analysé deux outils typiques qu'un auditeur pourrait utiliser pour évaluer la consommation du bâtiment :

- TRNSYS, une plateforme de simulation incluant un module de modélisation de l'enveloppe par fonction de transfert. Ce type de plateforme peut s'utiliser soit uniquement pour évaluer le besoin thermique du bâtiment, soit également pour coupler le module de l'enveloppe à des modules d'équipements. Cet outil est représentatif des outils utilisés pour la simulation des bâtiments et des systèmes.
- SimAudit, un outil de simulation incluant une modélisation de l'enveloppe par réseau électrique analogue et un couplage bâtiment / système pour certains systèmes. La programmation est effectuée de manière transparente dans un solveur d'équations [EES].

Afin de guider le choix d'un auditeur pour la sélection d'un de ces deux outils, nous allons les comparer du point de vue d'un auditeur.

Nous avons fait remarquer que le réseau R-C analogue était difficile à paramétrer pour une paroi quelconque. En effet l'auditeur doit résoudre un système matriciel. Cet inconvénient est limité car une bibliothèque de murs et de fenêtres est disponible.

D'un autre côté le modèle boîte noire de TRNSYS laisse à l'utilisateur le choix de sélectionner directement l'assemblage de matériaux à l'aide de leurs paramètres physiques ou à l'aide de matériaux intégrés dans une bibliothèque.

L'outil SimAudit intègre un certain nombre de systèmes typiques représentatifs de l'existant, ce qui confère à l'auditeur une rapidité appréciable d'utilisation. En effet, TRNSYS requiert de créer de multiples liaisons entre les modules d'équipements, de contrôle et de bâtiment.

Toutefois, la rapidité d'utilisation de SimAudit se réduit lorsqu'il s'agit d'adapter de nouvelles fonctions (ou systèmes) qui n'étaient pas intégrées dans la version originale, et ce en particulier lorsqu'un couplage système / bâtiment n'est pas nécessaire. En effet, l'auditeur doit comprendre le long raisonnement du programmeur.

Nous avons rassemblé l'ensemble de ces informations sous une forme qualitative au Tableau 5-1.

		SimAudit	TRNSYS
	Type de technique modélisation	Equations	Boîtes noires
Modélisation de l'enveloppe	Intégration des paramètres de l'enveloppe	Rapide	Lente
	Identification des paramètres de l'enveloppe	Difficile	Facile
Modélisation des équipements	Intégration de système typique	Rapide	Lente
	Adaptation a des systèmes spécifiques	Difficile	Facile si découplage besoin / système

Tableau 5-1 Sélection d'un outil de simulation

## 5.4 Modélisation du contrôle des équipements

Dans la liste d'opportunités du chapitre 2, nous avons référencé certaines améliorations techniques de l'exploitation, c'est-à-dire l'utilisation de stratégies performantes de contrôle :

- La régulation de la température de consigne et des composants du GPEG (voir annexe 1 ECO P2.5)
- Le séquençage central du chauffage et de la climatisation (voir annexe 2, fiche ECO O2.7)
- La modification du système de contrôle pour ajuster la température de consigne intérieure en fonction des conditions extérieures (voir annexe 2, fiche ECO P1.4)
- La mise en place d'un débit d'eau variable (voir annexe 2, fiche ECO P4.5)
- Arrêter les équipements de climatisation quand leur usage est inutile (voir annexe 2, fiche ECO O2.2)
- Arrêter les auxiliaires quand leur usage est inutile (voir annexe 2, fiche ECO O2.3)

Dans le but d'évaluer, à l'aide d'un outil de modélisation, l'impact de ces stratégies de contrôle, nous devons rechercher des modèles que l'inspecteur / l'auditeur peut utiliser facilement sur ces cas.

### 5.4.1 Technique de modélisation du contrôle et informations requises pour l'auditeur

Comme chaque régulateur pilote la puissance appelée d'un ou plusieurs équipements, l'évaluation du comportement d'un régulateur conditionne la consommation de ces équipements.

La plupart des schémas de régulation des systèmes de climatisation ont ainsi une structure à plusieurs boucles hiérarchisées. Cette hiérarchie correspond à des échelles de temps différentes : le changement de consigne s'effectue par exemple quotidiennement pour une boucle supérieure et toutes les minutes pour une boucle inférieure. Ainsi, le temps de réponse d'un système de régulation supérieur peut être considéré comme négligeable devant le temps de réponse des boucles inférieures.

La modélisation du contrôle peut donc être basée sur des modèles de régulateurs dont le degré de détail et de complexité varie avec le **niveau hiérarchique de boucle** :

- Au **niveau inférieur**, les logiciels offrent, pour la plupart, des modèles de régulateurs courants (T.O.R., P., P.I.D., ...). Mais le choix du mode de régulation ainsi que celui des paramètres est laissé aux soins de l'utilisateur ou du programmeur et donc de l'inspecteur / auditeur.
- Au **niveau supérieur**, les logiciels de simulation offrent, pour la plupart, des interfaces dédiées afin de définir les profils d'occupation, la programmation journalière de la ventilation, de la consigne de température, etc...

### 5.4.2 Interaction dynamique des régulateurs

Même si des régulateurs sont séparés physiquement, des interactions peuvent exister entre les différentes variables régulées.

Si les temps de réponse au niveau supérieur sont plus longs que ceux au niveau inférieur, les effets interactifs entre les deux niveaux sont donc très faibles. C'est par exemple le cas entre le contrôle local (régulation locale de la température) et le contrôle central (saison été-hiver).

Toutefois, si les temps de réponse sont du même ordre de grandeur pour chacun des deux niveaux, le contrôle local peut influencer le contrôle central et inversement.

Il est donc nécessaire d'examiner ces effets d'interaction pour l'évaluation des économies d'énergie d'opportunités concernant l'amélioration technique de l'exploitation.

### 5.4.3 Exemple d'interactivité dynamique

Nous souhaitons illustrer ces effets interactifs à l'aide d'un exemple simple entre la régulation locale du débit d'eau d'une batterie froide et la régulation du débit d'eau du réseau.

Dans cet exemple, nous supposons que :

- Les deux régulateurs ont un temps de réponse négligeable devant la période de temps considérée
- La puissance moyenne transférée pour la période de temps considérée ne dépend pas du type de régulateur

L'influence des deux approches, citées au paragraphe 5.4.1 est représentée :

- Dans la Figure 5-5 pour un régulateur Tout Ou Rien (T.O.R.)
- Dans la Figure 5-6 pour un régulateur Proportionnel (P.)
- Dans la Figure 5-7 pour un régulateur Proportionnel Intégral Dérivé (P.I.D.)

Dans ces trois figures, nous avons représenté schématiquement la puissance instantanée échangée (traits bleus) et le débit d'eau traversant la batterie (traits verts) au cours du temps pour ces trois types de régulateur.

Nous pouvons analyser l'impact du modèle de régulateur local de température sur le régulateur de débit de la pompe et donc indirectement l'impact en termes de consommation de la pompe.

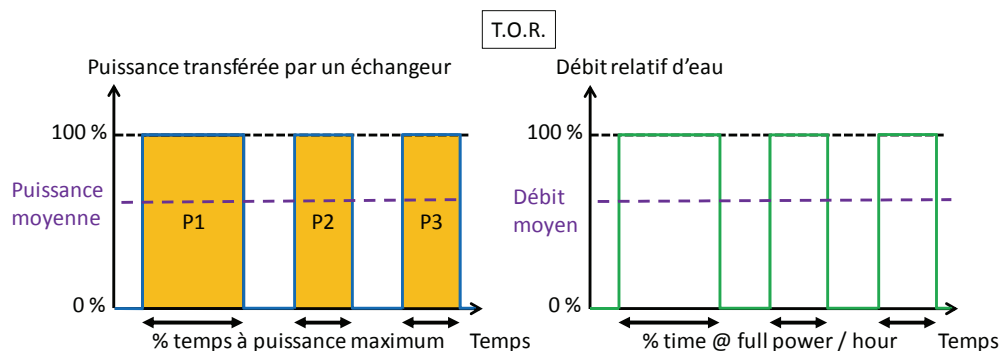


Figure 5-5 Comportement temporel schématisé d'un régulateur T.O.R.

Pour un régulateur TOR, la puissance échangée varie selon un créneau donc le débit également. Dans ce cas, le temps à puissance échangée maximale est égal au temps de fonctionnement à plein débit. Notons que la puissance moyenne échangée pour la période représentée est égale à la somme des aires notées P1, P2 et P3.

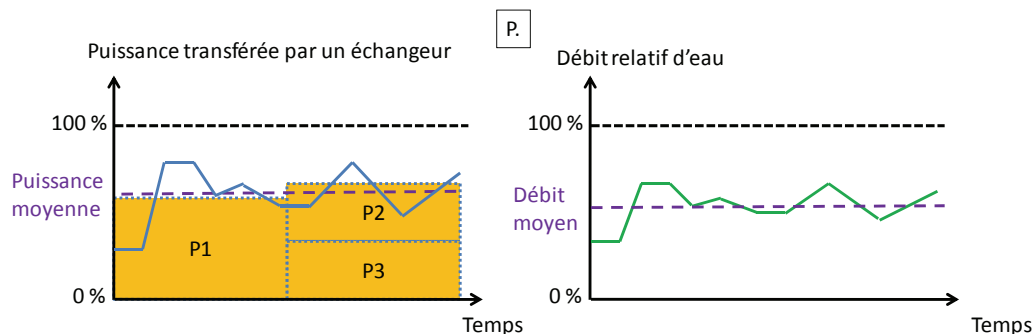


Figure 5-6 Comportement temporel schématisé d'un régulateur T.O.R.



Pour un régulateur P., des déviations s'opèrent en fonction du signal fournie par la sonde de température. Le débit traversant l'échangeur n'est pas strictement proportionnel à la puissance échangée, le débit moyen relatif sera inférieur à celui d'un régulateur TOR.

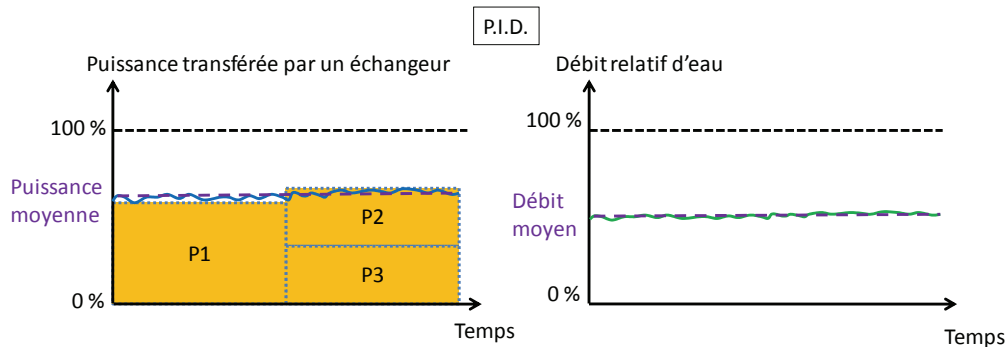


Figure 5-7 Comportement temporel schématisé d'un régulateur T.O.R.

De même, pour un régulateur P.I.D., le débit moyen relatif sera inférieur à celui d'un régulateur TOR.

Pour ces trois régulateurs et l'intervalle de temps considéré, la puissance moyenne échangée reste identique (traits pointillés violets). Toutefois, comme la puissance échangée par la batterie n'est pas proportionnelle au débit (chapitre 2, paragraphe 2.3.1 et chapitre 5 paragraphe 5.7), les débits moyens seront différents. Donc la consommation moyenne de la pompe sera différente pour chacun de ces régulateurs.

Nous nous baserons sur cet exemple pour formuler plusieurs propositions de modélisation pour le contrôle local.

#### 5.4.4 Modélisation du contrôle inférieur

Deux approches peuvent être utilisées afin d'évaluer le comportement du système de régulation du niveau inférieur :

- **L'estimation d'un signal moyen** pour une période considérée
- **Une évaluation du comportement dynamique** du signal de contrôle pendant la période considérée

La sélection d'une de ces approches doit être examinée par rapport à la dynamique du phénomène à observer.

Toutefois, il nous semble nécessaire de proposer des modèles **simples d'utilisation** pour permettre à l'inspecteur / l'auditeur d'effectuer plus rapidement des estimations et ce **sans calibrage**.

Nous proposons dans les paragraphes suivants deux techniques de modélisation :

- Une approche moyenne à un paramètre. Cette approche est par exemple utilisée dans l'outil SimAudit [SimAudit].
- Une approche idéalisée dynamique, sans paramètre, qui peut être utilisée pour effectuer un post traitement. Nous appliquons ce modèle au chapitre 6.

Le choix d'un de ces deux techniques requiert l'examen de l'interaction dynamique des régulateurs à modéliser.

##### 5.4.4.1 Approche moyenne : régulateur proportionnel idéal

Afin de modéliser un signal moyen pendant une période considérée, les consignes d'exploitation du chauffage et de la climatisation, nous proposons d'utiliser un régulateur proportionnel de gain  $C_{chaud}$  pour le chauffage et  $C_{froid}$  pour la climatisation en fonction



de la température intérieure ( $T_{in}$ ). La logique de contrôle est représentée sur le diagramme ci-dessous.

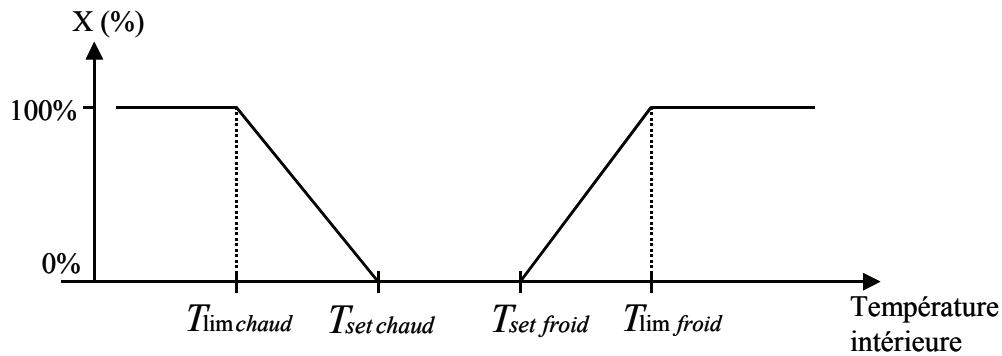


Figure 5-8 Loi de consigne en chauffage et en climatisation en fonction de la température intérieure à un instant  $t$ .

Il existe une température intérieure limite  $T_{lim\ chaud}$  à partir de laquelle le transfert thermique peut s'effectuer (ouverture de la vanne) proportionnellement au gain du régulateur. La bande proportionnelle du régulateur d'une vanne utilisée pour le contrôle local de la température en chauffage est exprimée à l'aide de l'expression ci-dessous :

$$T_{lim\ chaud} = T_{set\ chaud} - \frac{1}{C_{chaud}}$$

Avec  $C_{chaud}$  le gain du régulateur ( $K^{-1}$ )

Cette relation s'applique également pour le contrôle de la climatisation.

Notons que les températures de consignes ( $T_{set\ chaud}$  et  $T_{set\ froid}$ ) ne sont pas forcément fixes, elles peuvent dépendre du profil d'occupation, et donc du pas de temps considéré.

Notons que la charge thermique transférée au bâtiment en chaud comme en froid est calculé à partir de cette loi proportionnelle. Toutefois dans le cas de la [RT2005] ou bien encore dans le logiciel [ConsoClim], une loi binaire est appliquée pour calculer cette charge. Pour obtenir un résultat équivalent, il est donc nécessaire de prendre le gain des régulateurs à une valeur infinie. On voit ainsi l'influence que peut avoir l'utilisateur sur l'estimation des besoins.

#### 5.4.4.2 Approche dynamique idéale sans paramètre

Afin de modéliser le comportement dynamique de la boucle de contrôle local du débit d'eau pendant une période donnée, nous proposons de borner ce comportement par deux types de réponse de boucle fermée :

- Une action T.O.R. : la vanne est soit complètement fermée soit complètement ouverte. Ce type de régulateur peut être considéré comme la moins chère et la moins performante des solutions.
- Une action P.I.D. idéale : la position de la vanne est réglée pour assurer une réponse immédiate pour chaque charge thermique. Ce type de contrôle peut être considéré comme la méthode la plus chère et la plus précise. Cependant dans la réalité, ce régulateur demande un réglage précis pour fonctionner efficacement.

Nous notons que dans cette approche, l'auditeur peut se baser sur un examen qualitatif du contrôle pour affiner son évaluation.

#### 5.4.5 Modélisation du contrôle du niveau supérieur

Dans ce paragraphe, nous proposons un moyen simple pour intégrer le contrôle supérieur à un outil de modélisation.

Nous nous appuyons sur deux exemples :

- Le contrôle de l'arrêt des équipements en nous appuyant sur une définition de la saison de chauffage et de climatisation
- Le contrôle de la consigne de température intérieure en nous appuyant sur la définition d'un scenario d'occupation.

Ces deux exemples peuvent être facilement transposés aux autres régulateurs utilisés pour le contrôle de niveau supérieur.

Les périodes de chauffage et de climatisation sont limitées grâce à la prise en compte de température maximale (pour le chauffage) et minimale (pour la climatisation). La fonction binaire ci-dessous est intégrée au modèle. Nous avons représenté à la Figure 5-9 l'algorithme permettant de réguler les vannes d'eau chaude et les vannes d'eau glacée. Dans cet algorithme, des températures extérieures limites servent à définir les saisons de chauffage et de climatisation. Puis la régulation de niveau local intervient pour effectuer la régulation des vannes. Finalement, un test conditionnel, représenté par la fonction de la Figure 5-10, modélise le contrôle supérieur utilisé pour la période été / hiver.

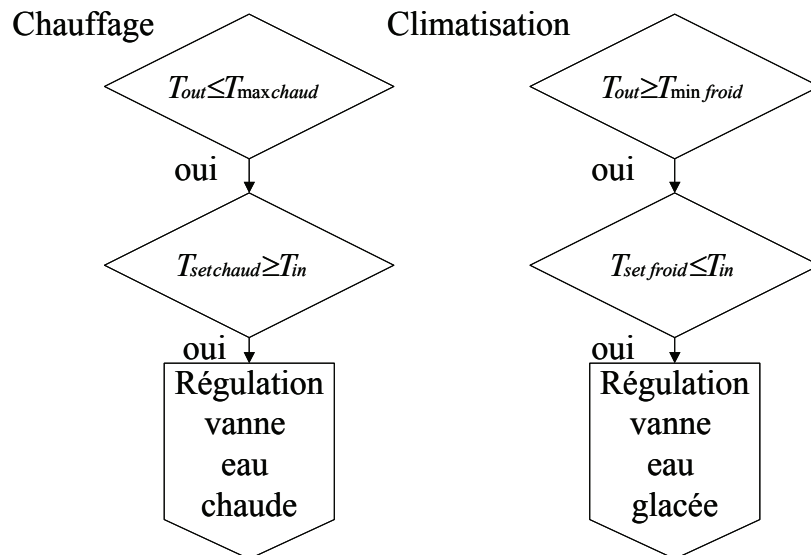


Figure 5-9 Exemple de principe de la loi de consigne pour la saison hiver / été

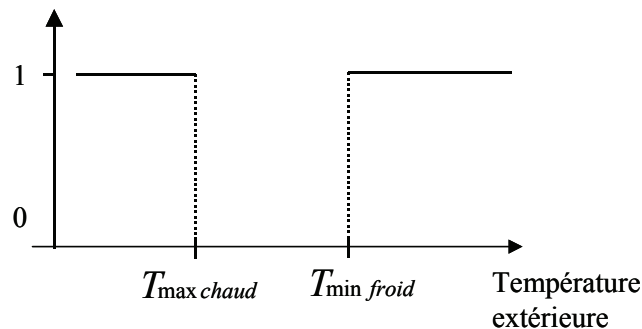


Figure 5-10 Température d'inversion

De la même manière, la période d'inoccupation des locaux (profil hebdomadaire et journalier) est utilisée pour définir une température de consigne variable, par exemple le week-end et la nuit. Les profils utilisés pour cette fonction sont binaires.

## 5.5 Modélisation d'un moteur pour évaluer des économies d'énergie

Les moteurs électriques sont utilisés dans la plupart des postes de consommation d'une installation de climatisation (pompes, ventilateurs, compresseurs). La modélisation de leurs propriétés techniques est donc essentielle pour évaluer leur consommation ou évaluer des économies d'énergie (voir annexe 1 ECO P1.6).

La puissance électrique nominale d'un moteur s'écrit :

$$P_{elec\ nom} = \frac{P_{shaft\ nom}}{\eta_{elec\ nom}}$$

Afin d'évaluer la puissance électrique appelée par un moteur, l'auditeur doit être en mesure d'identifier la courbe de rendement du moteur en fonction de sa charge.

Cependant cet élément est souvent inconnu et en particulier pour les moteurs de petite puissance. A défaut, nous proposons à l'auditeur de rechercher les éléments suivants :

- Le rendement nominal du moteur
- Un facteur de correction de charge

Pour l'aider dans cette tâche, nous proposons ci-dessous certains résultats tirés de la littérature.

### 5.5.1 Typologie de moteur

Plusieurs gammes technologiques de moteurs électriques sont disponibles auprès des fabricants. Par exemple la Figure 5-11 reprend les différentes gammes technologiques représentatives du marché. Pour chacune de celles-ci le rendement nominal du moteur (axe des ordonnées) est représenté en fonction de la puissance nominale à l'arbre (axe des abscisses).

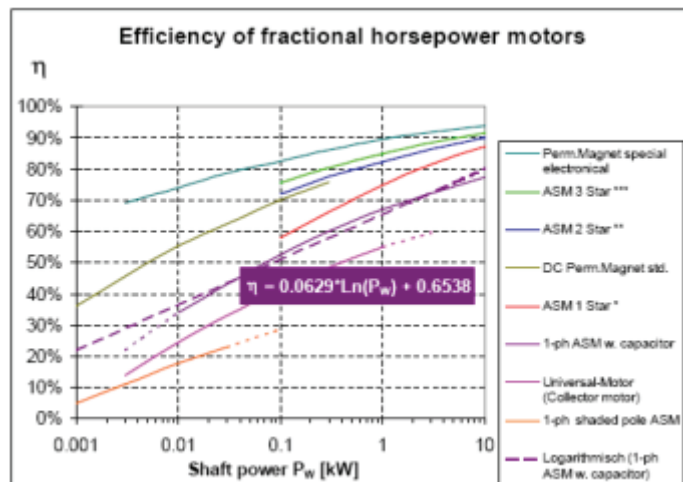


Figure 5-11 Efficacité nominale des moteurs électriques [EupVent09]

Quelle que soit la technologie employée, le rendement nominal augmente avec la puissance nominale à l'arbre. Parmi les moteurs les plus performants on distingue principalement les moteurs à aimant permanent, et les moteurs asynchrones soumis à un étiquetage énergétique. Ainsi un changement de technologie, par exemple l'utilisation d'un moteur à aimant permanent, permet d'augmenter les économies d'énergie.

Des corrélations permettraient d'exprimer le rendement en fonction de la puissance à l'arbre. Par exemple dans [Sfeir05], les auteurs proposent d'utiliser la relation suivante :

$$\eta_{elec\ nom} = \left( 79.35 + \frac{14.3 P_{shaft\ nom}}{3.18 + P_{shaft\ nom}} \right) \text{ pour } 0.75\ kW < P_{shaft\ nom} < 37.5\ kW$$

Cette vision technique est restrictive, elle ne s'applique pas pour toutes les technologies de moteur (cf. Figure 5-11). D'autres relations pourraient être extrapolées en utilisant la Figure 5-11.

### 5.5.2 Chute de rendement à charge partielle

Les propriétés techniques du **moteur à charge partielle** peuvent être également modélisées pour prendre en compte le fonctionnement du moteur en régime non nominal. D'une manière générale, un coefficient de correction  $F$  est utilisé. Le rendement électrique s'écrit donc :

$$\eta_{elec} = \eta_{elec\ nom} F$$

Nous proposons de retenir le modèle utilisé [Sfeir05] pour exprimer ce facteur de correction en fonction de la charge partielle du moteur ( $PL$ ) et de trois coefficients (cf. Tableau 5-2) :

$$\begin{cases} F = -b PL + a PL / (c + PL) \\ PL = P_{shaft} / P_{shaft\ nom} \end{cases}$$

$P_{shaft\ nom}$ (kW)	a	b	c
0.75	144.56	0.166	26.27
1.125-3.75	220.86	0.64	35.56
5.625	171.61	0.41	22.43
7.5	145.02	0.28	14.58
11.25-18.75	124.74	0.17	7.75
22.5-45	111.99	0.0798	4

Tableau 5-2 Coefficients utilisés pour le facteur de correction à charge partielle

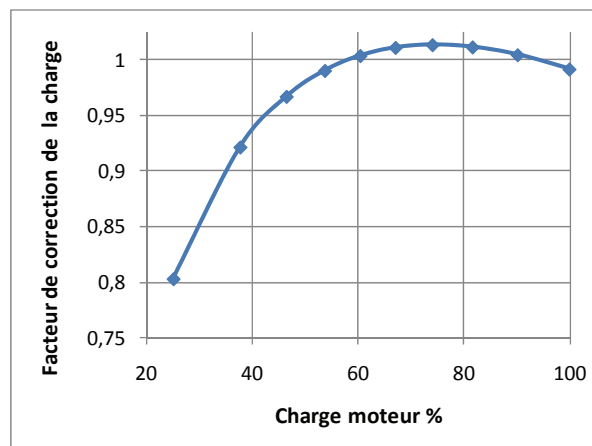


Figure 5-12 Exemple de facteur de correction du rendement en régime non nominal

### 5.5.3 Modélisation d'un variateur de vitesse pour évaluer des économies d'énergie

Dans les paragraphes précédents, nous avons proposé des modèles pour évaluer les économies d'énergie liées aux moteurs. Dans ce paragraphe nous recherchons un modèle permettant de les compléter pour prendre en compte une variation de leur vitesse. En effet, l'adaptation de la vitesse du moteur peut être une piste d'économie d'énergie :

- Appliquer un débit d'eau / air variable (voir annexe 1, ECO P4.5 et ECO P3.6)
- Réduire le débit d'eau ou d'air en rapport aux besoins (voir annexe 1, ECO O4.22 et ECO O4.9)

La puissance électrique appelée par l'ensemble moteur / variateur s'écrit :

$$P_{elec} = \frac{P_{shaft}}{\eta_{elec} \eta_{VSD}}$$

Ces actions requièrent la mise en place d'un variateur de fréquence pour les moteurs à courant alternatif.

Nous proposons un modèle qui permet à l'auditeur d'estimer le rendement électrique de ce type de système [Sfeir05].

$$\eta_{VSD} = 87.84 + 0.225 S - 0.001228 S^2$$

Avec S le ratio de la fréquence d'utilisation sur la fréquence nominale exprimé en % et  $\eta_{VSD}$  exprimé en %.

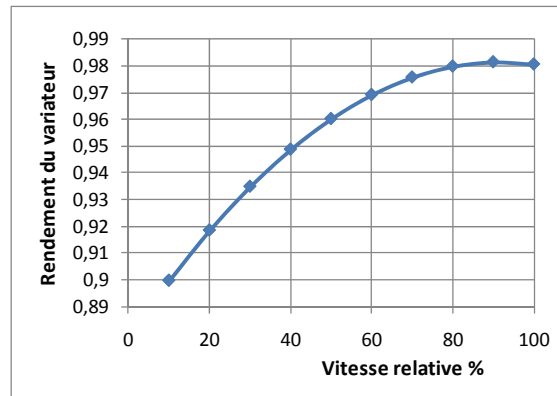


Figure 5-13 Rendement du variateur de vitesse

## 5.6 Modélisation de la distribution d'eau / d'air pour évaluer des économies d'énergie

Un réseau de distribution est constitué par :

- Une turbomachine (pompe ou ventilateur) et son moteur
- Un réseau hydraulique / aéraulique

Afin d'évaluer la puissance hydraulique (ou aéraulique) d'une pompe (ou d'un ventilateur), l'auditeur doit être en mesure d'identifier les informations suivantes :

- Le rendement hydraulique (ou aéraulique) de la pompe (ou du ventilateur)
- La courbe caractéristique de la pompe (ou du ventilateur)
- La courbe caractéristique du réseau hydraulique (ou aéraulique)
- Le point de fonctionnement de la pompe (ou du ventilateur)
- Le temps de fonctionnement pour ce point de fonctionnement

Si ces informations sont manquantes des modèles par défaut doivent être proposés.

Puis pour évaluer la consommation électrique d'une pompe (ou d'un ventilateur), l'auditeur doit identifier les informations que nous avons rassemblées au paragraphe 5.5.

Ces techniques de modélisation peuvent être utilisées pour évaluer l'économie d'énergie des opportunités suivantes :

- Utiliser une pompe / un ventilateur efficace (voir annexe 1, ECO P4.1 / ECO P3.3)
- Appliquer un débit d'eau / air variable (voir annexe 1, ECO P4.5 et ECO P3.6 en annexe)
- Réduire le débit d'eau ou d'air par rapport aux besoins (voir annexe 1, ECO O4.22 / ECO O4.9)

### 5.6.1 Définition des pertes hydrauliques / aérauliques d'une turbomachine

La modélisation des pertes hydrauliques / aérauliques d'une turbomachine (ventilateurs, pompes) est essentielle pour évaluer la puissance mécanique nécessaire pour assurer le mouvement du rotor de la machine. Indirectement, ces pertes influencent donc la consommation électrique d'un système de ventilation ou de pompes.

La réduction de ces pertes permet donc d'économiser de l'énergie pour le système de ventilation (voir annexe 1, ECO P3.3) ou pour les pompes (voir annexe 1, ECO P4.1). Nous recherchons donc des modèles permettant d'évaluer les économies d'énergie de ces opportunités.

D'une manière générale la puissance hydraulique / aéraulique ( $P_{hydrau}$ ) d'une turbomachine s'écrit :

$$P_{hydrau} = \dot{m} \Delta P$$

Avec  $P_{hydrau}$  en Watt,  $\dot{m}$  le débit d'eau en m<sup>3</sup>/s,  $\Delta P$  le différentiel de pression créé par la turbomachine en Pa.

La puissance mécanique à l'arbre du moteur ( $P_{shaft}$ ) s'écrit :

$$P_{shaft} = \frac{\dot{m} \Delta P}{\eta_{hydrau}}$$

Avec  $P_{shaft}$  en Watt et  $\eta_{hydrau}$  le rendement hydraulique / aéraulique de la turbomachine.

La puissance électrique de la pompe ( $P_{elec}$ ) s'écrit alors :

- $P_{elec} = \frac{\dot{m} \Delta P}{\eta_{elec} \eta_{hydrau}}$  pour une pompe sans variateur de vitesse
- $P_{elec} = \frac{\dot{m} \Delta P}{\eta_{elec} \eta_{VSD} \eta_{hydrau}}$  pour une pompe équipée d'un variateur de vitesse

### 5.6.2 Le point de meilleure efficacité

L'équation de la courbe caractéristique de la pompe peut être extrapolée par une équation du second degré grâce aux données techniques du réseau (cf. Figure 5-14) ou au minimum par trois couples de mesures (pression ; débit). Cette équation s'exprime comme suit :

$$\Delta P = a_r q^2 + b_r q + c_r$$

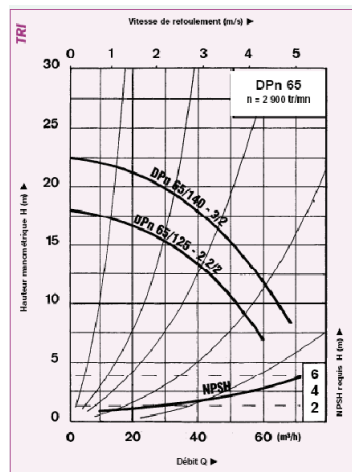


Figure 5-14 Exemple de données techniques d'une pompe [WiloT]

Ainsi en mesurant trois débits de l'installation en agissant sur les ouvertures de vannes de réglages de la branche principale d'un réseau<sup>17</sup>, l'auditeur peut identifier facilement le triplet ( $a_r$ ;  $b_r$ ;  $c_r$ ).

Le rendement hydraulique d'une turbomachine dépend de ces conditions de fonctionnement. Mais, il existe un point pour lequel ce rendement est maximum. Ce point est appelé point de meilleur efficacité ou « Best Efficiency Point » en anglais (BEP) (cf. Figure 5-15). Les tests normatifs utilisent ce point pour l'évaluation du rendement hydraulique d'une pompe ou aéraulique d'un ventilateur.

Ce point de référence permet de définir un couple débit relatif / pression relative ( $q_r$ ;  $\Delta P_r$ ) comme le ratio du débit / pression de fonctionnement ( $q$ ;  $\Delta P$ ) de la pompe sur le débit / pression du point de meilleur efficacité ( $q_{BEP}$ ;  $\Delta P_{BEP}$ ) :

$$q_r = \frac{q}{q_{BEP}} ; \Delta P_r = \frac{\Delta P}{\Delta P_{BEP}}$$

<sup>17</sup> Le réseau doit être équilibré hydrauliquement

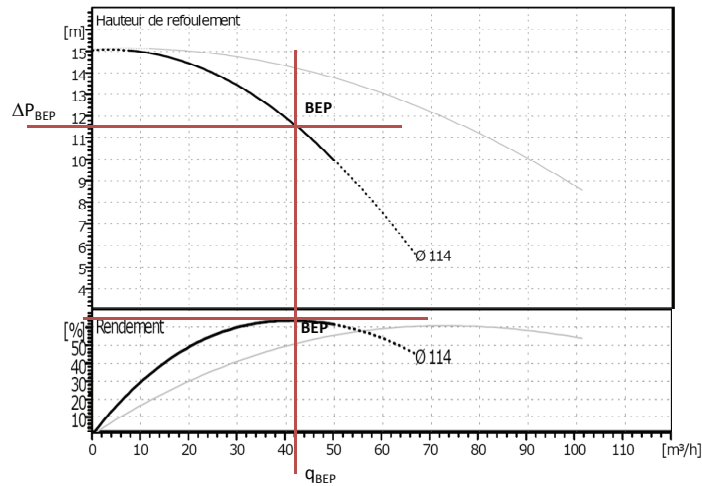


Figure 5-15 Identification du BEP à partir des données techniques, adaptée de [WiloT]

Notons que le BEP peut différer des conditions nominales de fonctionnement du réseau de distribution. Le débit relatif défini par rapport aux conditions nominales du réseau peut donc être différent du débit  $q_r$ .

L'efficacité hydraulique de la pompe peut être extrapolée des données techniques en utilisant une équation du second degré :

$$\eta_{hydrau} = a_h q^2 + b_h q + c_h$$

### 5.6.3 Modélisation d'une pompe sans documentation technique

Sans les mesures ou la documentation technique de la pompe, la courbe caractéristique suivante pourrait être utilisée comme hypothèse par défaut [Sfeir05] :

$$\Delta P_r = 1.15 + 0.169 q_r - 0.318 q_r^2 \text{ pour une courbe « plate »}$$

$$\Delta P_r = 1.91 + 0.995 q_r - 1.920 q_r^2 \text{ pour courbe « plongeante »}$$

De la même manière, nous proposons un exemple de modélisation de l'efficacité hydraulique [Sfeir05] :

$$\begin{cases} \eta_{hydrau} = 0.022 + 1.066 q_r - 0.553 q_r^2 & (\text{efficacité faible}) \\ \eta_{hydrau} = 0.172 + 1.066 q_r - 0.553 q_r^2 & (\text{efficacité moyenne}) \\ \eta_{hydrau} = 0.322 + 1.066 q_r - 0.553 q_r^2 & (\text{haute efficacité}) \end{cases}$$

Nous avons représenté ces courbes à la Figure 5-16.

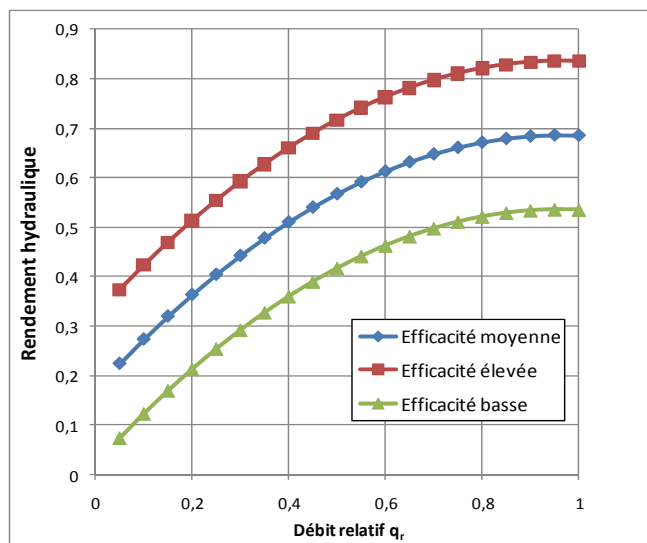


Figure 5-16 Efficacité hydraulique d'une pompe [Sfeir05]



#### 5.6.4 Modélisation des pertes hydrauliques du réseau

Le réseau d'eau peut être modélisé par un ensemble de résistances hydrauliques. Chacune d'entre elles s'exprime par la relation suivante :

$$R_i = \frac{J}{Q_{vi}^2}$$

Le modèle de réseau d'eau peut alors être simplifié en utilisant les règles d'assemblage de résistances en série et en parallèle conformément à un réseau analogue électrique de résistance équivalente  $R_{eq}$ .

Pour évaluer la perte de charge du réseau il y a deux possibilités :

- Si le réseau n'est pas sous pression, une mesure de débit et une mesure de pression pour connaître la courbe caractéristique du réseau. Dans ce cas on veillera à vérifier que le réseau est ou non sous pression<sup>18</sup>. La loi du paragraphe 5.6.2 est alors utilisée pour extrapoler le ou les points de mesures de pression et débit.
- Si la courbe caractéristique du réseau n'est pas mesurable, il est nécessaire d'estimer la perte de charge du réseau.

#### 5.6.5 Couplage turbomachine / réseau

Le point de fonctionnement de la pompe est alors déterminé comme l'intersection de la courbe de charge du réseau et de la courbe caractéristique de la pompe (Figure 5-17) à l'aide de l'équation suivante :

$$\Delta P = R_{eq} Q_v^2$$

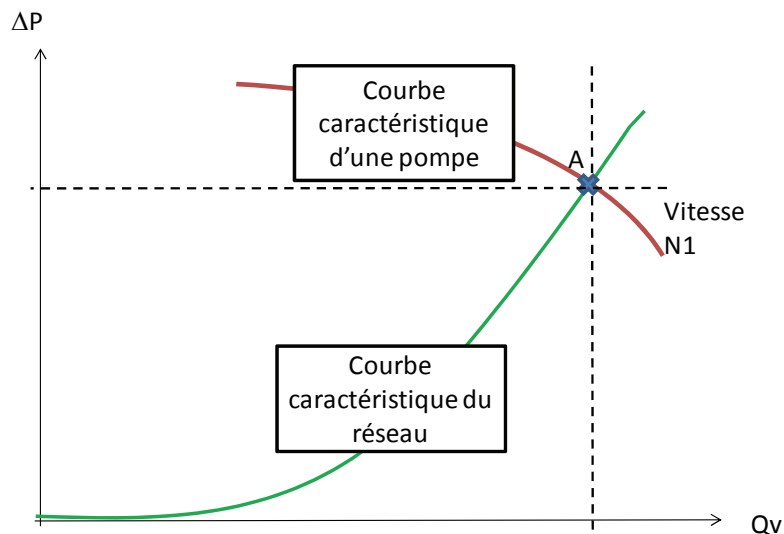


Figure 5-17 Point de fonctionnement de la pompe

Lorsque les informations sur le rendement hydraulique de la pompe et sur le réseau ne sont pas disponibles, il est possible à l'auditeur de supposer que le point de fonctionnement nominal correspond au BEP.

<sup>18</sup> Si un vase ou d'expansion ou un groupe de maintien de pression est installé, le réseau est sous pression. Il est alors nécessaire de mesurer la pression au niveau neutre du réseau c'est-à-dire au niveau de cet organe.

### 5.6.6 Modélisation de la variation de débit

Nous avons montré, au paragraphe 5.5.3, que l'efficacité d'un moteur et d'un régulateur de fréquence dépendent respectivement de la charge et de la vitesse de rotation du moteur.

Afin d'évaluer l'économie d'énergie de la mise en place d'un tel dispositif, pour obtenir un débit variable ou une réduction de débit d'air / d'eau (voir annexe 2 fiche ECO P4.5 et voir annexe 1 ECO P3.6, ECO 4.22 et ECO O4.9), nous devons relier ces deux performances avec les propriétés d'une pompe / d'un ventilateur.

Les performances d'une turbomachine peuvent être reliées à celle d'une turbomachine **homothétique** dont toutes les dimensions varient proportionnellement (courbure des pales, nombre de pales). Ces relations s'appellent les lois de similitude ou lois de Rateau.

Ces lois s'expriment par les équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{v2} = q_{v1} \frac{N_2}{N_1} \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^3 \\ \Delta P_2 = \Delta P_1 \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^2 \frac{\rho_2}{\rho_1} \\ P_{hydrau2} = P_{hydrau1} \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^3 \frac{\rho_2}{\rho_1} \\ \eta_2 = \eta_1 \end{array} \right.$$

Pour deux pompes ou ventilateurs de même dimension fonctionnant avec le même fluide ces relations s'expriment à l'aide des équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{v2} = q_{v1} \frac{N_2}{N_1} \\ \Delta P_2 = \Delta P_1 \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 \\ P_{hydrau2} = P_{hydrau1} \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^3 \\ \eta_2 = \eta_1 \end{array} \right.$$

Ainsi l'auditeur peut utiliser ces relations pour évaluer la vitesse de rotation correspondant à une certaine réduction de débit.

Une loi de régulation, comme celle présentée au chapitre 1 paragraphe 1.8.1 permet alors de déterminer la puissance hydraulique de la pompe et donc la puissance électrique.

## 5.7 Modélisation d'une batterie froide

Pour un système existant la connaissance du comportement thermique de la batterie pour différentes plages de fonctionnement pourrait permettre de détecter des défauts par rapport aux conditions originales de fonctionnement ou de dimensionnement.

La lecture des abaques ou des tableaux constructeurs fait apparaître l'existence de relations liant la puissance échangée au débit de fluide, à la taille ou à la géométrie de l'échangeur (celle-ci variant en fonction du modèle).

Toutefois, les données constructeur ou encore les informations relatives au dimensionnement sont souvent lacunaires en audit. Des modèles peuvent alors être utilisés pour combler ce manque d'information.

Pour évaluer la puissance d'un échangeur pour certaines conditions de température, il est nécessaire d'explicitier des modèles facilement paramétrables.

L'auditeur pourra utiliser ces modèles afin de vérifier :

- Le dimensionnement des échangeurs en vue d'en augmenter la surface (voir annexe 2, fiche ECO P5.3)
- Evaluer le débit d'eau traversant l'échangeur pour une charge thermique quelconque. Cette évaluation peut permettre par exemple de déterminer la puissance d'une pompe à débit variable (voir annexe 2, fiche ECO P4.5)

Il existe deux types de modèle :

- les modèles reposant sur les caractéristiques géométriques
- un modèle paramétré sur un point de fonctionnement

Comme la recherche ou la mesure des caractéristiques géométrique peut être fastidieuse, nous proposons de retenir le deuxième type de modèles. Par exemple, les deux modules développés par [Morisot00] peuvent être utilisés pour représenter le fonctionnement d'une batterie froide à eau glacée placée dans une CTA. Le premier module permet de calibrer le modèle à l'aide de la puissance nominale échangée pour un débit d'air et d'eau ou à l'aide d'un point de fonctionnement mesuré sur site. Cette première étape permet de déterminer les coefficients de transfert thermique de l'échangeur. Le second module permet de connaître la puissance transférée par la batterie, en fonction du débit des différents fluides par un couplage des coefficients de transfert aux différents débits des fluides. La chaleur sensible et la chaleur totale échangées sont calculées par bilan thermique, par l'introduction des mesures des propriétés de l'air et de la température d'eau en sortie.

Le principe de calcul de ces deux modules est représenté à la Figure 5-18.

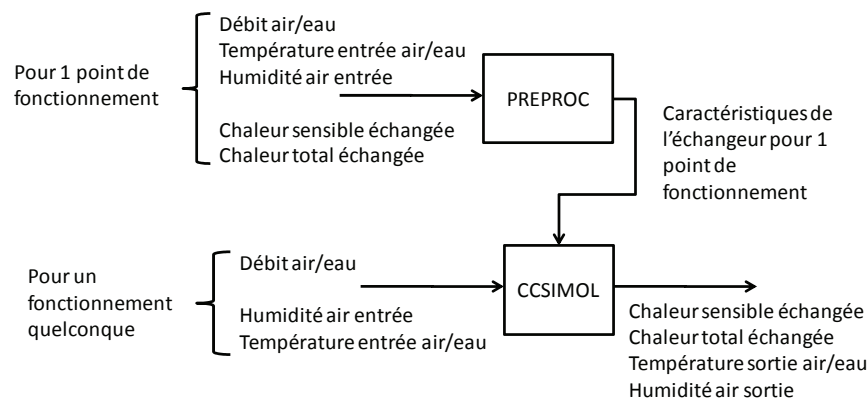


Figure 5-18 Modules de calcul de [Morisot00] pour la modélisation d'un échangeur

Le premier module qui permet de déterminer les coefficients d'échange intérieur et extérieur, est basé sur un calcul en quatre étapes principales :

- Le calcul de l'enthalpie des différents fluides
- Le calcul du transfert global d'échange de l'échangeur à l'aide de la méthode de la différence moyenne logarithmique de l'enthalpie des fluides en entrée et en sortie d'échangeur ( $\Delta h_{lm}$ )
- Le calcul de l'efficacité totale dans la représentation de Threlked (agrégation du transfert de chaleur et de masse)
- Le calcul du coefficient d'échange extérieur en utilisant la méthode NTU –  $\epsilon$  dans la représentation de Threlked d'une batterie fictive. Cette batterie fictive a un débit infini côté eau et permettant de donner les mêmes conditions de fonctionnement côté air.

Le second module qui permet de calculer les chaleurs échangées et les températures de sortie pour des conditions d'entrée données, est basé sur un calcul en quatre étapes principales :

- Le calcul des coefficients d'échanges en fonction du débit d'eau ou d'air
- La détermination du régime de fonctionnement de la batterie
- Le calcul de l'efficacité à l'aide de la méthode NTU –  $\epsilon$
- Le calcul des variables d'état (enthalpie pour régime humide, température pour un régime sec) des fluides à l'aide du bilan de chaleur et de la définition de l'efficacité

Nous détaillons brièvement les différents modèles utilisés dans ces deux modules dans les paragraphes suivants.

#### 5.7.1 Calcul de l'efficacité pour un échangeur : méthode NTU – $\epsilon$

Ce modèle permet de déterminer les conditions de sorties à partir des conditions d'entrées et du coefficient globale d'échange d'une batterie en régime quelconque. Il est nécessaire de prendre en compte la configuration de l'échangeur.

$$\epsilon = \frac{1 - \exp(-NTU(1-R))}{1-R \exp(-NTU(1-R))} \text{ pour un échangeur à contre-courant (voir Figure 5-19)}$$

$$\epsilon = \frac{1 - \exp(-NTU(1-R))}{1+R} \text{ pour un échangeur à co-courant}$$

Avec

$$R = \frac{C_{min}}{C_{max}}$$

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}}$$

Avec  $UA$  le coefficient global d'échange,  $C_{min}$  le débit capacitif minimum,  $C_{max}$  le débit capacitif maximum. Ces coefficients sont obtenus pour un régime de fonctionnement donné, humide ou sec, ils sont définis dans les paragraphes suivants.

#### 5.7.2 Calcul du coefficient de transfert thermique de la batterie en régime humide $UA_h$ : méthode $\Delta h_{lm}$

Le coefficient global d'échange est calculé à partir de la puissance nominale totale :

$$\dot{Q}_{tot} = UA_h \Delta h_{lm}$$

La différence enthalpique en moyenne logarithmique pour une batterie en régime de fonctionnement humide est définie de la manière suivante :

$$\Delta h_{lm} = \frac{(h_{ae} - h_{es}) - (h_{as} - h_{ee})}{\ln \left( \frac{h_{ae} - h_{es}}{h_{as} - h_{ee}} \right)}$$

Avec h l'enthalpie, le premier indice a désigne l'air et e l'eau, le second indice désigne l'entrée (e) ou la sortie (s) du fluide.

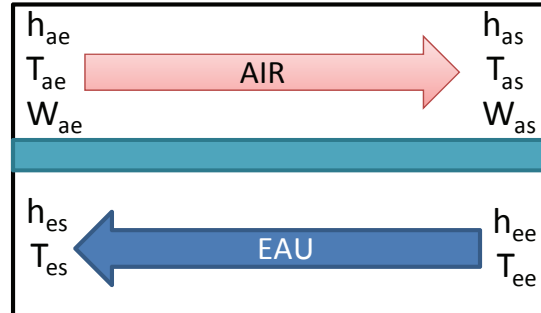


Figure 5-19 Schéma de principe d'un échangeur à contre-courant

### 5.7.3 Représentation de Threlked pour la batterie humide

Le régime humide est défini par l'existence d'un film d'eau présent sur toute la longueur de la batterie.

Il est nécessaire de prendre en compte l'apparition d'un film d'eau à l'extérieur de la batterie. Celui-ci est pris en compte par la représentation de Threlked, c'est-à-dire par l'agrégation du transfert de chaleur et de masse. Le coefficient global d'échange ( $UA_h$ ) est défini à partir des coefficients d'échanges côté air ( $UA_{ext}$ ) et côté eau ( $UA_{int}$ )

$$\frac{1}{UA_h} = \frac{C_{p\ air}}{UA_{ext}} + \frac{C_{p\ air\ sat}}{UA_{int}} \text{ (en considérant constant } C_{p\ air\ sat} \text{)}$$

$$C_{air} = \dot{m}_{air} \text{ et } C_{eau} = \dot{m}_{eau} \frac{C_{p\ eau}}{C_{p\ sat}}$$

$$C_{min} = \min(C_{air}; C_{eau})$$

$$C_{max} = \max(C_{air}; C_{eau})$$

### 5.7.4 Influence des débits sur les coefficients d'échange

L'influence du débit d'air ou d' sur les coefficients d'échanges pour une batterie froide est prise en compte à l'aide des relations suivantes [Morisot00]<sup>19</sup>:

$$UA_{int} = \frac{UA_{int\ rat}}{\dot{m}_{eau\ rat}^{0.8}} \dot{m}_{eau}^{0.8}$$

$$UA_{ext} = \frac{UA_{int\ rat}}{\dot{V}_{air\ rat}^{0.67}} \dot{V}_{air}^{0.67} \text{ (valable pour une batterie en régime sec)}$$

$$UA_{ext} = \frac{UA_{int\ rat}}{\dot{V}_{air\ rat}^{0.77}} \dot{V}_{air}^{0.77} \text{ (valable pour une batterie froide en régime humide)}$$

### 5.7.5 Transition régime humide/sec

Pour déterminer le régime de fonctionnement d'une batterie, il est nécessaire de connaître les propriétés de l'air au moment de la transition régime sec / régime humide.

<sup>19</sup> « Les batteries considérées doivent être à courants croisés, d'au moins 4 rangs ou au plus 3 rangs. Dans cette dernière configuration l'erreur est de quelques pour-cent et est difficile de dissocier la précision intrinsèque du modèle avec les précisions des données mesurées. Les modèles présentés dans le document ne sont pas utilisables directement pour des types d'ailettes particulières (type persiennées ou gaufrées) ni pour des tubes à hautes performances (rainurés), sans modification préalable. Le régime laminaire coté eau est également mal représenté. Pour plus de détail on se reportera au document original » [Morisot00].

Si la température d'entrée d'air est supérieure à la température de rosée alors l'échange est sec.

Si la condition précédente n'est pas respectée pour l'entrée, le régime est considéré à priori humide.

Toutefois si la température de la surface à l'entrée de la batterie est inférieure à la température de rosée de l'air à l'entrée, alors la batterie fonctionne bien en régime humide. Par contre si cette condition n'est pas respectée, la batterie fonctionne en régime partiellement humide ou sec. Il est alors nécessaire de déterminer la température de la surface en sortie et de la comparer à la température de rosée à la sortie.

Nous retenons que le régime partiellement humide repose sur l'hypothèse de Braun, c'est-à-dire que le régime est considéré soit comme totalement sec soit comme totalement humide, le régime sélectionné est celui pour lequel l'échange est maximum.

#### 5.7.6 Bilan de chaleur et définition de l'efficacité pour le calcul des conditions de sorties et de la puissance échangée

Les conditions de sorties s'expriment à l'aide des relations suivantes :

$$\begin{aligned}X_{1 \text{ sortie}} &= X_{1 \text{ entrée}} - \epsilon \frac{C_{\min}}{C_1} (X_{\text{entrée max}} - X_{\text{entrée min}}) \\X_{2 \text{ sortie}} &= X_{2 \text{ entrée}} + \epsilon \frac{C_{\min}}{C_2} (X_{\text{entrée max}} - X_{\text{entrée min}}) \\X_{\text{entrée max}} &= \max(X_{1 \text{ entrée}}; X_{2 \text{ entrée}}) \\X_{\text{entrée min}} &= \min(X_{1 \text{ entrée}}; X_{2 \text{ entrée}})\end{aligned}$$

Avec  $X_{i \text{ entrée}}$  la température ou l'enthalpie d'entrée du fluide i,  $X_{i \text{ sortie}}$  la température de transition du régime humide / sec.

## 5.8 Synthèse de la sélection de modèles et techniques de modélisation

L'ensemble des modèles qui seront utilisés par la suite de la thèse et qu'un auditeur peut utiliser a été présenté dans ce chapitre. Le modèle de bâtiments et les modèles d'équipements ont été validés expérimentalement dans d'autres travaux. Ces modèles permettent de répondre aux différentes exigences de la méthodologie présentée au chapitre 3 et au chapitre 4.

Le domaine de variation des paramètres de ces modèles permettra de quantifier de manière précise l'impact énergétique d'opportunités mais également de développer des procédures d'identification d'économies d'énergie utilisables par les praticiens.

## Chapitre 6 Application des méthodes pour l'exploitation du réseau d'eau glacée

Dans cette partie, nous recherchons à appliquer les différentes méthodologies du chapitre 3 et chapitre 4 à des actions relatives à l'exploitation du réseau d'eau glacée.

Nous avons répertorié au chapitre 2, certaines stratégies permettant de **piloter** la distribution d'eau :

- Une **exploitation à débit variable** pour le réseau secondaire (chapitre 1, paragraphe 1.6.2)
- Une **programmation** pour la mise en marche et l'arrêt des composants techniques (chapitre 1, paragraphe 1.8.2)

Pour ces fonctions, nous cherchons à proposer des procédures d'identification d'économies d'énergie relatives à :

- L'introduction d'un variateur de vitesse dans le système de pompage du réseau d'eau glacée (voir chapitre 2, paragraphe 2.3.2 et annexe 2, fiche ECO P4.5)
- La mise en place d'un contrôle central annuel pour arrêter les équipements de distribution d'eau lorsque leur utilisation est inutile (voir chapitre 2, paragraphe 2.3.3 et annexe 2, fiche ECO O2.7)

Dans un premier temps nous analysons en détail ces différentes solutions techniques (paragraphe 6.1).

Nous cherchons ensuite à mettre au point des procédures permettant l'identification (paragraphe 6.2) et des méthodes d'évaluation (paragraphe 6.3) pour ces deux opportunités.

Notre analyse nous conduit à développer une méthode d'évaluation dynamique avec laquelle nous pourrions évaluer chacune de ces opportunités pour des bâtiments et systèmes représentatifs.

Pour élaborer nos outils d'évaluation, nous nous basons sur la méthodologie de benchmark. Ainsi conformément au chapitre 3, paragraphe 3.4.2, il est nécessaire d'effectuer les actions suivantes :

- Mettre au point une base de données constituant les caractéristiques de la population, cette base de données sera utilisée pour définir les particularités des bâtiments étudiés. Cette base de données est constituée de façon à mettre en évidence la sélection des facteurs ayant un impact potentiellement sensible sur le ou les indicateurs de performance (paragraphe 6.4)
- Effectuer des études de sensibilité de ces facteurs sur le ou les indicateurs de performance (paragraphe 6.5.2, 6.5.5 ; paragraphes 6.6.5, 6.6.8). Pour réaliser cette évaluation, nous utilisons les différents modèles présentés au chapitre 5.
- Sélectionner un ou plusieurs facteurs ayant un impact significatif sur l'indicateur de performance et de créer une base de données d'indicateur(s) de performance en fonction de cette sélection (paragraphe 6.6.9).



La sélection d'une technique de modélisation et des modèles dépend étroitement des facteurs ayant un impact potentiellement sensible sur l'indicateur (paragraphe 6.6.3 et 6.6.4).

Dans ce chapitre, nous proposons de calculer un unique indicateur de performance noté  $E_{\%}$ . Celui-ci s'exprime en fonction de la consommation pré-modernisation ( $C_{pré}$ ) et de la consommation post-modernisation ( $C_{post}$ ), nous analysons l'impact des facteurs à l'aide de cette relation :

$$E_{\%} = 1 - \frac{C_{post}}{C_{pré}}$$

Notons que cet indicateur est évalué pendant une période d'évaluation correspondant à celle de l'évaluation de la consommation pré-modernisation et à celle de l'évaluation post-modernisation.

L'économie d'énergie ( $E$ ) pour cette période d'évaluation s'écrit alors :

$$E = C_{pré} E_{\%}$$

Nous établissons ensuite différentes procédures d'évaluation pour mettre au point les procédures de vérification de l'économie d'énergie en fonction de la disponibilité et du coût des informations (paragraphe 6.8).

Enfin, nous illustrons l'application des procédures développées sur une étude de cas.

## 6.1 Analyse technique des solutions

Dans cette partie nous présentons physiquement et technologiquement deux améliorations consistant respectivement à utiliser un débit variable d'eau et une des périodes de fonctionnement pour les pompes de distribution. A travers cette analyse nous cherchons à mettre au point des critères permettant d'identifier ces deux améliorations.

### 6.1.1 Utilisation d'un débit d'eau variable

La puissance électrique d'une pompe ( $P_{pompe}$ ) s'exprime en fonction de la puissance hydraulique fournie par la pompe et de l'efficacité totale du système de pompage ( $\eta_{tot}$ ) :

$$P_{pompe} = \frac{P_{hydrau}}{\eta_{tot}}$$

La puissance hydraulique est le produit du différentiel de pression  $\Delta P$  (en Pa) et le débit volumique d'eau  $q_v$  (en m<sup>3</sup>/s) :

$$P_{hydrau} = \Delta P q_v$$

Le rendement total se décompose en une efficacité hydraulique ( $\eta_{hydrau}$ ) liée aux pertes hydrauliques et une efficacité du moteur d'entraînement ( $\eta_{moteur}$ ) liée aux pertes du moteur<sup>20</sup> :

$$\eta_{tot} = \eta_{moteur} \eta_{hydrau}$$

Donc :

$$P_{pompe} = \frac{\Delta P q_v}{\eta_{moteur} \eta_{hydrau}}$$

Pour une pompe à vitesse fixe et pour un réseau d'eau équilibré, le débit et le différentiel de pression sont constants. Donc la puissance est constante quelle que soit la charge thermique du bâtiment.

En intégrant un dispositif permettant une régulation du débit d'eau dans le circuit de distribution d'eau glacée (circuit secondaire) et de l'adapter à la charge, il est possible d'éliminer le bipasse dont l'eau le traversant est bippassée inutilement.

Comme évoqué au chapitre 2, paragraphe 2.3.2, le principe d'un variateur de vitesse est de contrôler la vitesse de rotation de la roue **en fonction de la charge thermique** du bâtiment. Une modification typique d'un système à débit d'eau constant peut s'effectuer selon l'architecture donnée à la

Figure 1-16. Le système de pompage du circuit primaire étant maintenu à vitesse fixe, le système de pompage du circuit secondaire est adapté afin d'introduire un débit variable au niveau de sa branche principale. Les bippasses au niveau d'une zone ou des unités terminales sont supprimés.

Un dispositif permettant la variation de débit d'eau est constitué par les éléments suivants :

- Une loi de régulation du débit d'eau en fonction de la perte de charge du réseau car la perte de charge du réseau varie lorsque les vannes s'ouvrent ou se ferment en fonction de la charge thermique
- Un variateur de vitesse permettant la variation de la vitesse de l'arbre du moteur électrique pour respecter une consigne portant sur le différentiel de pression de la branche du réseau contrôlé
- La roue et le corps de la pompe permettant de mettre en mouvement le fluide

<sup>20</sup> Nous n'évoquons pas ici les possibles pertes de transmission de la puissance mécanique (par exemple le glissement d'une courroie).

- Des capteurs de pression et/ou débit placés sur le réseau permettant de comparer la loi de pression/débit.

Ces différents éléments sont représentés schématiquement sur la Figure 6-1. Notons qu'un régulateur électronique est utilisé après le comparateur.

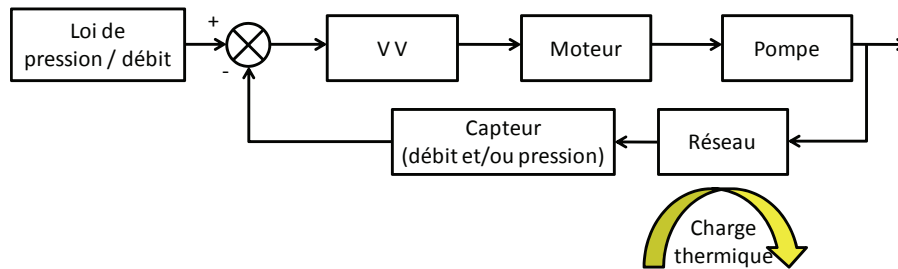


Figure 6-1 Schéma bloc du contrôle de la vitesse d'une pompe

Plusieurs lois de pression/débit peuvent être utilisées afin de réguler ce système. Celles-ci sont définies au chapitre 1. Nous rappelons ci-dessous les **trois stratégies de contrôle** que nous retiendrons dans la suite de ce chapitre et les représentons schématiquement sur la Figure 6-2 :

- Stratégie 1 : **pression différentielle (PD) constante**. Un exemple de fonctionnement est donné par le point de fonctionnement B et la vitesse N2 sur la Figure 6-2.
- Stratégie 2 : **PD proportionnelle**. Un exemple de fonctionnement est donné par le point de fonctionnement C et la vitesse N3 sur la Figure 6-2.
- Stratégie 3 : **contrôle basé sur la demande**. Un exemple de fonctionnement est donné par le point de fonctionnement D et la vitesse N4 sur la Figure 6-2.

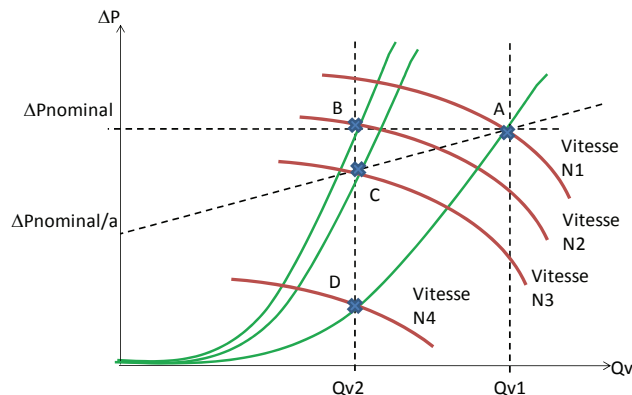


Figure 6-2 Vitesse associée à chaque stratégie de contrôle

La stratégie la plus simple à mettre en place est la stratégie 1 car seuls deux capteurs de pression sont à installer. Les deux autres stratégies requièrent la mise en place de capteurs de débit additionnels. Cependant les constructeurs de pompes proposent de plus en plus des systèmes de pompage intégrant une évaluation des caractéristiques de fonctionnement du réseau, ce qui peut rendre les stratégies 2 et 3 plus simples à mettre en place. Notons également que la stratégie 3 représente le fonctionnement hydraulique idéal, car la pression hydraulique est nulle pour un débit nul.

Le **variateur de vitesse** peut se décliner selon deux moyens techniques en fonction du type de moteur :

- Pour un moteur à courant alternatif (AC), la variation de la fréquence d'alimentation est utilisée

- Pour un moteur à courant continu (DC), la variation de la tension d'alimentation est utilisée

D'autres adaptations du système existant sont préalablement nécessaires avant toute introduction du dispositif de débit variable. En effet, **l'utilisation de vannes de régulation deux voies des unités de traitement d'air est nécessaire** afin de permettre une élévation de la pression lors de leur fermeture et ainsi permettre de réguler le débit. Les différents by-pass du circuit secondaire doivent être également supprimés. Ainsi un système de distribution équipé de vannes 3 voies demandera un coût d'adaptation plus important qu'un système déjà équipé de vannes 2 voies de façon à effectuer l'adaptation nécessaire. Ainsi pour un système équipée de vannes 3 voies, un nombre important d'unités terminales sera plus coûteux à adapter qu'un système comprenant un nombre limité de centrales de traitement d'air.

Une étude économique devra prendre en compte ces différents éléments d'adaptation, pour sélectionner une stratégie d'exploitation à débit variable.

#### 6.1.2 Consigne été-hiver pour un système 4 tubes

Nous rappelons (voir chapitre 2, paragraphe 2.3.3) que la consigne été / hiver choisie par l'exploitant n'est pas obligatoirement la solution optimisée. L'étude de la consigne été / hiver et de son influence sur la consommation énergétique et sur le confort demande l'utilisation de méthodes pratiques et faciles à mettre en place sur le terrain qui ne sont pas actuellement disponibles pour les exploitant (voir chapitre 1, paragraphe 1.8.2).

Nous proposons dans ce chapitre de rechercher une solution optimale pour un système quatre tubes. Cette solution doit permettre de maintenir le confort de l'occupant toute l'année, ce qui est à priori l'objectif avec ce type de système.

Nous proposons donc de définir le contrôle non optimal comme le fonctionnement annuel sans arrêt du système de distribution d'eau. Ce référentiel peut permettre d'identifier une opportunité d'améliorer l'exploitation du réseau.

## 6.2 Procédure d'identification des opportunités

Pour identifier la possibilité de mise en place d'un variateur de vitesse sur les pompes de distribution d'eau glacée, l'inspecteur / l'auditeur peut simplement examiner les informations relatives à la conception du système ou effectuer une reconnaissance visuelle des équipements en place.

Pour identifier si une stratégie de contrôle annuel des pompes a été mise en place, l'inspecteur peut recourir à un indicateur permettant de connaître le fonctionnement de la pompe. Cet indicateur peut être obtenu en analysant les fonctions utilisées du système de gestion technique du bâtiment ou en analysant la puissance de la pompe périodiquement toute l'année ou encore en discutant avec le service d'exploitation.

Cependant nous proposons une procédure alternative. Cette procédure consiste à effectuer une visite de l'installation en période hivernale et en période estivale. Ces visites permettraient de connaître l'état de fonctionnement des machines de production d'eau chaude et d'eau glacée et des auxiliaires associés. Ainsi, si pendant la saison hivernale on constate que le GPEG ou les auxiliaires restent allumés, il est nécessaire d'introduire un mode été afin de réduire la consommation énergétique des équipements. De la même manière, un mode hiver devra être défini lorsque la chaudière ou les auxiliaires fonctionnent continûment. L'application de cette procédure d'identification requiert la mise au point d'un référentiel précis pour définir la saison hivernal et la saison estivale. De plus ce référentiel peut permettre d'évaluer les économies d'énergie associées à ce contrôle optimal.

Nous avons donc proposé deux procédures d'identification associées pour la stratégie de débit variable et la stratégie de contrôle saisonnier des pompes. Dans le paragraphe suivant nous cherchons des référentiels permettant d'évaluer les économies d'énergie de ces deux stratégies.

### 6.3 Recherche de méthodes d'évaluation des économies d'énergie

#### 6.3.1 Débit d'eau glacée variable

Une méthode d'évaluation statique existe pour l'usage de la variation de débit en chauffage pour le parc résidentiel et un réseau de radiateurs. Un indicateur a été élaboré pour effectuer les tests normatifs utilisés pour définir des étiquettes de performance énergétique [EUP08]. Il se formule comme une pondération de quelques points, selon le tableau suivant.

Débit relatif (%)	Temps %
100	6
75	15
50	35
25	44

Tableau 6-1 Profil de charge d'une pompe selon [EUP08] pour le parc résidentiel allemand

A l'aide de ce profil de charge, il est possible de déterminer une consommation à partir d'une loi de régulation pression / débit en mesurant la puissance ( $P_i$ ), pour chacun de ces débits relatifs et définir ensuite un index de performance ( $EEI$ ) en introduisant une consommation de référence  $C_{ref}$  à débit constant.

$$EEI = \frac{\sum_{i=1}^4 P_i t_i}{C_{ref}}$$

Une méthode d'évaluation statique à quatre classes (« bin ») peut être proposée en utilisant le Tableau 6-1 de cette approche normative. En utilisant de profil de temps de fonctionnement et en utilisant les quatre puissances à charge partielle il est possible d'obtenir une estimation des économies d'énergie par comparaison avec une pompe fonctionnant à charge maximale.

Ainsi des constructeurs de pompes utilisent ce référentiel afin de donner une estimation des économies d'énergie allant « jusqu'à 50% » voir « jusqu'à 80% » [Grundfos], [Salmon], [Wilo] et inciter leurs clients à un investissement plus important. Toutefois il convient de tester cette démarche pour notre cadre d'application.

#### 6.3.2 Consigne été-hiver optimale pour un système quatre tubes

La plus triviale des approches consiste à considérer un système de contrôle central non optimisé comme référence. Celui-ci ne permet pas de distinguer les deux modes de fonctionnement été et hiver. Les économies d'énergie associées pourront être évaluées par rapport au temps de fonctionnement des pompes. Afin de connaître le temps de fonctionnement optimisé il est nécessaire de connaître la saison de chauffage et la saison de climatisation.

#### 6.3.3 Synthèse des méthodes d'évaluation pour l'exploitation du réseau d'eau glacée

Nous proposons d'utiliser une méthode d'évaluation dynamique pour mettre au point des méthodes d'évaluation au nombre d'entrées limité. Ces méthodes permettent de déterminer l'économie d'énergie potentielle d'une exploitation à débit variable. Conformément à ce que nous avons précisé au chapitre 4, paragraphe 4.1.6, les méthodes les plus simples d'utilisation ne peuvent être que des méthodes statiques ou des méthodes basées sur des ratios. Nous rappelons que ces méthodes peuvent être élaborées à l'aide d'une méthode de type benchmark (voir chapitre 4, paragraphe 4.1.3 et 4.1.4). Nous recherchons donc à élaborer des indicateurs sous la forme de corrélations ou de bases de données d'indicateurs (voir chapitre 3, paragraphe 3.1.4), et d'explicitier la relation entre ces indicateurs et les économies d'énergie. Les paramètres de ces indicateurs doivent prendre en compte les facteurs de variations de l'économie d'énergie (voir chapitre 3, paragraphe 3.4.3).

## 6.4 Mise au point d'une base de donnée d'équipements et de bâtiments

Afin de rechercher les valeurs d'indicateurs permettant de quantifier l'impact énergétique de l'exploitation du système de distribution pour le réseau d'eau glacée, nous proposons de rechercher celles-ci à l'aide d'un ensemble de simulations, aucune base de données mesurées n'étant disponible.

### 6.4.1 Rappel de la démarche

Nous avons divisé les facteurs selon deux groupes conformément au chapitre 3, paragraphe 3.4.3 :

- **Les facteurs de diversité** servant à définir l'échantillon de la population visée par le benchmarking. Ces facteurs de diversité sont propres au **parc de bâtiments** (localisation, enveloppe,...) et aux **équipements**.
- **Les facteurs de différenciation** servant à différencier un individu au sein d'un groupe homogène. Ceux-ci permettent de définir les études de sensibilité du benchmark. Par exemple l'usage et les conditions climatiques peuvent être des facteurs de différenciation.

Chacun de ces facteurs de diversité est exposé en détail dans les paragraphes suivants à l'aide de modèles physiques. Les différents paramètres de ces modèles permettent de représenter l'ensemble des informations susceptibles d'être déterminés pendant la phase de documentation du bâtiment, du système et de l'environnement extérieur et sociologique.

Nous nous attachons à expliciter :

- Les propriétés spatiales, thermiques et climatiques des **facteurs de diversité du parc de bâtiments**
- Les propriétés techniques des équipements **des facteurs de diversité des équipements**
- Le lien entre le **dimensionnement** des équipements et la diversité du parc
- Les **facteurs de différenciation** par la mise en place de modèles déterministes liés à un usage spécifique des zones d'occupation et des équipements techniques ou liés à la variabilité du climat.

Pour chacune des deux opportunités, nous présélectionnons certains de ces facteurs pour effectuer les analyses de sensibilité (paragraphe 6.5.2 et 6.6.2). Ces études nous permettent ensuite de mettre au point une base de données de valeurs de l'indicateur pour chacune des améliorations.

### 6.4.2 Facteurs de diversité du parc de bâtiments, recherche de bâtiments typiques

Afin d'établir une **base de données de bâtiments**, nous proposons de retenir la classification employée dans [Filfli06] afin de caractériser les propriétés spatiales, thermiques et la localisation climatique de l'enveloppe.

Chacun des types de bâtiment constitue un bâtiment typique, représentatif d'un groupe homogène. Le premier type correspond à des bâtiments de grande surface, fortement vitrés. Le deuxième type regroupe des bâtiments de taille plus modeste, leur surface de vitrage est plus faible que celle des bâtiments du premier type. Le troisième type concerne les petits bâtiments que l'on rencontre dans les zones industrielles et les pépinières d'entreprises. Trois sous-catégories sont distinguées dans le premier type, celles-ci correspondent à des spécificités géométriques internes (espaces clos ou ouverts) et externes (surface vitrée).

La distribution sur le parc Français de ces différents types de bâtiments est donnée dans le Tableau 6-2 avec les principales caractéristiques géométriques.

Type de bâtiment		Type 1 a	Type 1 b	Type 1 c	Type 2	Type 3
Répartition sur le parc		14%	20%	33%	80%	25%
Surface nette		15000			5000	1000
Surface climatisée/Surface nette		94%	77%	81%	77%	76%
Nombre d'étage		12			4	2
Surface des parois /surface nette	Total	45%	50%	66%	67%	104%
	Murs verticaux	37%	42%	58%	42%	54%
	Toiture	8%			25%	50%
	Vitrages	13%	17%	26%	9%	21%
Surface vitrages/ Surface des murs verticaux		50%			27,5%	34%

Tableau 6-2 Répartition et caractéristiques géométriques de bâtiments typiques [IEA48]

Chacun des types de bâtiment est constitué par trois zones thermiques climatisées pour chacun des étages :

- Deux zones de bureaux (zone 1 et 2)
- Une salle de conférence

La répartition des surfaces par usage est donnée au Tableau 6-3.

Type de bâtiment		Type 1 a	Type 1 b	Type 1 c	Type 2	Type 3
Surface nette		15000			5000	1000
Surface par type d'occupation / Surface nette	Bureaux	78%	55%	60%	55%	58%
	Salles de réunion	16%	22%	21%	22%	18%
	WC	3%			3%	3%
	Couloirs	3%	20%	16%	20%	21%
Surface bureaux / surface climatisée		83%	71%	74%	71%	76%
Surface salles de conférence / surface climatisée		17%	29%	26%	29%	24%

Tableau 6-3 Caractéristiques géométriques par zone d'occupation [IEA48]

La localisation des bâtiments permet d'étendre notre base de données de bâtiments existants. Une étude basée sur les degrés jours de climatisation et de chauffage, réalisée dans [KeepCool10], a permis de définir cinq zones climatiques pour le climat européen. Les villes représentatives pour chacune des zones sont présentées au Tableau 6-4 et une carte montre le découpage géographique de chacune des zones à la Figure 6-3. Nous avons retenu les zones climatique 1 à 4.



Zones climatiques	Ville	Ville Représentative
Zone 1	Athens - Larnaca - Luga - Palerme - Seville	Palerme
Zone 2	Lisbon - Madrid - Marseille - Rome	Lisbon
Zone 3	Bratislava - Budapest - Ljubjana - Milan - Vienna	Milan
Zone 4	Amsterdam - Berlin - Brussels - Copenhagen - Dublin - London - Macon - Nancy - Paris - Prague - Warszawa	Paris
Zone 5	Helsinki - Riga - Stockholm - Gdansk - Tovarane	Stockholm

Tableau 6-4 Répartition de 30 villes Européennes dans cinq zone climatiques basées sur le flux solaire global, les degrés heures de climatisation et de chauffage [KeepCool10]

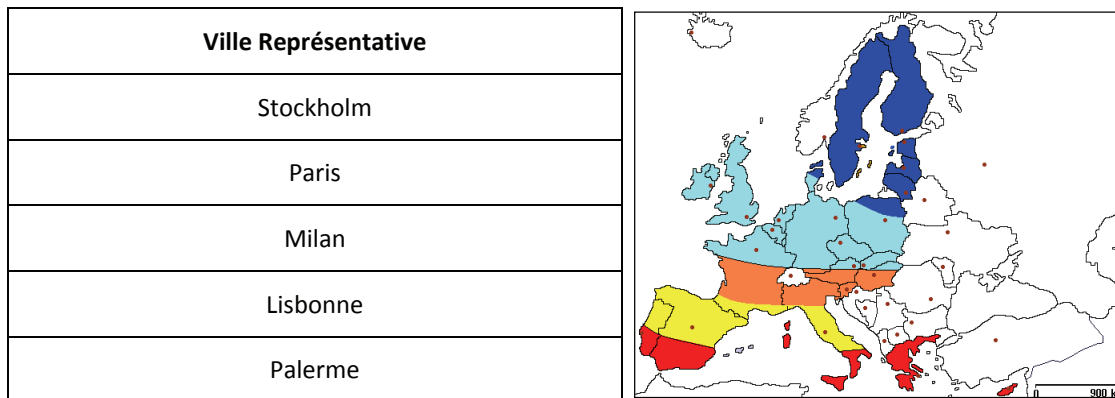


Figure 6-3. Carte des zones climatiques [KeepCool10]

Les différents facteurs (typologie de bâtiment et climat) permettent ainsi d'avoir une base de données statistique pour prendre en compte la diversité du parc de bâtiments.

#### 6.4.3 Les facteurs de diversité technique, recherche des équipements représentatifs

Comme chaque système de génie climatique a été conçu de manière unique par l'assemblage de différents composants techniques (cf. chapitre 1), **des systèmes typiques** doivent être sélectionnés afin de caractériser les équipements pour chacun des types de bâtiments. L'étude EECCAC [EECCAC03] a montré la prédominance des sous systèmes de type ventilo-convecteur et centrale de traitement d'air comme le montre la Figure 6-4. Nous retiendrons donc ces types de systèmes.

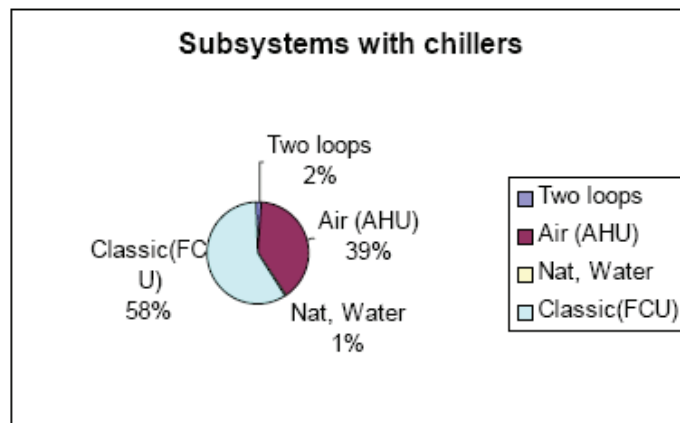


Figure 6-4 Répartition des sous systèmes utilisant un G.P.E.G. en Europe en 1998 [EECCAC03]

De plus, une répartition de ces deux types de systèmes a été réalisée dans [Filfli06] par rapport à la typologie de bâtiment introduite au paragraphe 6.4.2, cette analyse est présentée dans le Tableau 6-5.

	VC	CTA (débit air constant)	CTA (débit air variable)
Type 1 a	✓	✓	✓
Type 1 b	✓		✓
Type 1 c	✓		✓
Type 2	✓		
Type 3	✓		

Tableau 6-5 Matrice système/bâtiment [IEA48]

Cette analyse permet d'avoir une base de données statistique pour prendre en compte la diversité des systèmes. Toutefois il est nécessaire de la compléter par les modèles permettant de caractériser les propriétés des équipements. Nous nous attachons le plus possible à décrire les modèles existants qui pourraient permettre de **représenter statistiquement** les propriétés techniques des équipements. Mais les paramètres de ces modèles doivent également pouvoir **être déterminés in-situ lors d'une inspection ou d'un audit**.

Le réseau d'eau glacée, comportant les éléments techniques nécessaire à la distribution de débit d'eau glacée, doit être modélisé. Afin d'élaborer ce modèle, il est nécessaire de définir les modèles représentatifs du système de pompage : **le moteur électrique, le corps de pompe**.

Plusieurs modèles **d'efficacité hydraulique** d'une pompe sont disponibles dans [Sfeir05] et sont définies au chapitre 5, paragraphe 5.6.3. Nous retenons un modèle d'efficacité moyenne. Ce rendement hydraulique s'exprime en fonction du débit relatif. Le débit relatif est défini à l'aide du point d'efficacité maximum de la pompe, c'est-à-dire que pour un débit relatif de 1, le rendement hydraulique de la pompe est maximal (voir définition du BEP au paragraphe 5.6.2). Ce point constitue le point de fonctionnement nominal de la pompe. L'efficacité hydraulique est une fonction du débit relatif de la pompe et donc permet de déterminer la puissance à l'arbre du moteur.

Plusieurs gammes technologiques de moteur électrique sont disponibles auprès des fabricants. Par exemple, la Figure 5-11 reprend les différentes **gammes technologiques représentatives du marché**, pour chacune d'entre elles le rendement nominal du moteur (axe des ordonnées) est représenté en fonction de la puissance nominale à l'arbre (axe des abscisses). Quelle que soit la technologie employée, le rendement nominal augmente avec la puissance nominale à l'arbre. Parmi les moteurs les plus performants on distingue principalement les moteurs à aimant permanent, et les moteurs asynchrones soumis à un étiquetage énergétique. Ainsi un changement de technologie, par exemple l'utilisation d'un moteur à aimant permanent, pourrait permettre d'augmenter les économies d'énergie.

Nous rappelons (chapitre 5, paragraphe 5.5.2) que les propriétés techniques du **moteur à charge partielle** peuvent être également modélisées pour prendre en compte le fonctionnement du moteur en régime non nominal [Sfeir05]. Un exemple de facteur de correction à charge partielle du moteur est donné à la Figure 5-12.

La puissance consommée peut être calculée en utilisant ces trois relations.

Pour modéliser un échangeur de chaleur, il existe un modèle paramétré sur un point de fonctionnement (chapitre 5, paragraphe 5.7). Celui-ci est paramétré à l'aide d'une documentation constructeur qui permet de déterminer le coefficient d'échange (W/K) et ce pour différentes vitesses d'air.

#### 6.4.4 Lien entre la diversité du parc immobilier et la diversité technique

Comme nous l'avons mis en évidence au chapitre 1, il existe un lien entre la charge thermique maximale d'un bâtiment et le dimensionnement du système de climatisation. Il est donc nécessaire d'explicitier les règles de dimensionnement qui peuvent avoir une

influence sur l'économie. Nous cherchons dans ce paragraphe à expliciter ces règles pour notre typologie de bâtiments.

Nous supposons tout d'abord que les unités terminales sont dimensionnées pour répondre au besoin thermique en chaud comme en froid. Le débit d'eau du réseau secondaire peut alors être estimé à l'aide du débit nominal de chacune des unités.

D'autre part, il est nécessaire de déterminer le différentiel de pression du réseau secondaire, ce qui permet d'estimer la puissance hydraulique nominale du système de pompage. Le Tableau 6-6 permet d'estimer ce différentiel en fonction de notre typologie de bâtiments présentée au paragraphe 6.4.2. Nous reviendrons sur les valeurs de ce tableau au paragraphe 6.7.5.

Type de bâtiment		Type 1 a	Type 1 b	Type 1 c	Type 2	Type 3
Longueur la plus grande du réseau (m)	Ventilo-convecteur	400			300	100
	CTA	50				
$\Delta P$ / élément (kPa) [RT2005]	Ventilo-convecteur	20				
	CTA	35				
$\Delta P$ pompe (kPa) avec 150 Pa/m [RT2005]	Ventilo-convecteur	80	80	80	65	35
	CTA	42,5				

Tableau 6-6 Différentiel de pression nominal de la pompe en fonction de la typologie du bâtiment [IEA48]

Notons que pour le calcul du différentiel de pression, tous les ventilo-convecteurs sont considérés être placés en parallèle.

#### 6.4.5 Les facteurs de différenciation

Différents facteurs de différenciation devraient être pris en compte :

- Le profil d'usage intermittent du système de climatisation
- Le temps de réponse du régulateur
- L'action de l'occupant sur le système de ventilation
- La variabilité annuelle du climat (par exemple l'évolution de la température moyenne annuelle)
- Les charges internes (la puissance des équipements de bureautique et de l'éclairage peut évoluer pour un bâtiment, et peut être très différente d'un bâtiment à l'autre.)

Nous avons supposé des modèles déterministes afin de prendre en compte ces facteurs de différenciation :

- Un profil typique d'occupation est utilisé pour chacune des zones de bureaux (zone 1 et zone 2) et pour chacune des salles de conférences. Les profils d'occupation sont invariants pour chacun des types d'usage dans notre étude et sont ceux de [IEA48]. Différents profils sont présentés à la Figure 6-5.
- Deux modèles de régulateur (T.O.R. et P.I.D. idéal), introduits au paragraphe 5.4.4.2. pour prendre en compte le temps de réponse de la régulation des vannes. Celles-ci correspondent respectivement à une ouverture binaire de la vanne (débit nul ou débit maximum), et à une ouverture progressive de la vanne avec un temps de réponse minimum.

- Deux modèles d'usage de la vitesse d'air : une vitesse fixe et invariante ; trois vitesses automatiquement déterminées en fonction du besoin thermique de la pièce. Notons que le confort acoustique de l'utilisateur doit être amélioré avec l'introduction d'un débit automatique d'air.
- Cinq climats sous la forme de fichiers météorologiques, dont quatre mesurés pour Paris pour les années 2000, 2001, 2002, 2003 et un fichier de référence<sup>21</sup>.
- Six valeurs de charges liées aux équipements de bureautique : 10 W/m<sup>2</sup>, 14 W/m<sup>2</sup>, 18 W/m<sup>2</sup>, 24 W/m<sup>2</sup>, 26 W/m<sup>2</sup> et 30 W/m<sup>2</sup>

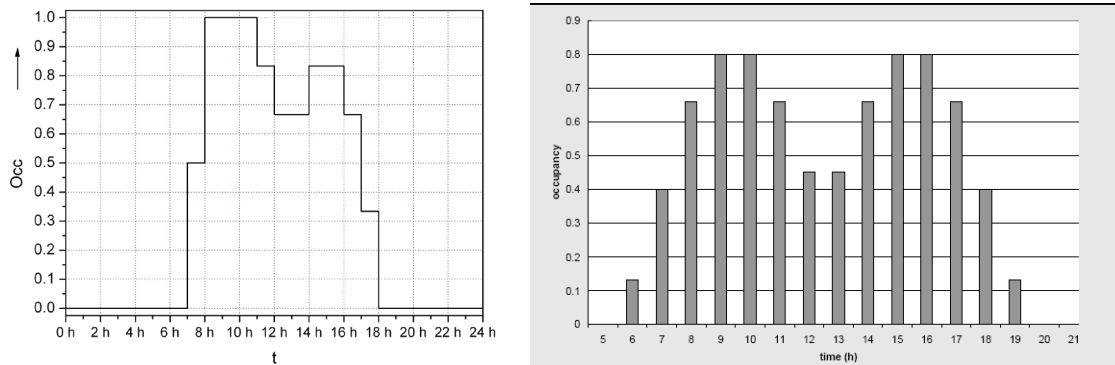


Figure 6-5 Profil d'occupation d'un bureau selon a) [EN15232] b) [IEA48]

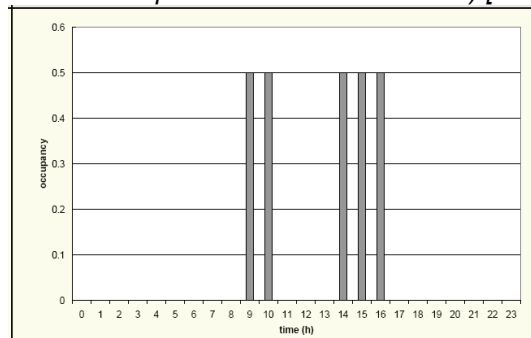


Figure 6-6 Profil d'occupation d'une salle de conférence selon [IEA48]

Afin de rendre le temps de réponse du P.I.D. très petit devant les variations de la température intérieure et à fortiori de la charge thermique, le régulateur P.I.D. sera considéré suffisamment adapté à la zone climatisée. Cette hypothèse permet de considérer que le débit d'eau instantané traversant l'échangeur sera la valeur moyenne du débit d'eau nécessaire afin de couvrir le besoin thermique d'un pas de temps de la simulation. Pour le régulateur T.O.R. le temps d'ouverture maximale est calculée pour chaque pas de temps, la pompe débitera donc soit un débit relatif de 20% soit un débit de 100%.

<sup>21</sup> Ce fichier référence correspond au fichier METEONORM.

## 6.5 Méthode d'évaluation des économies d'énergie pour le contrôle d'un système 4 tubes

Nous proposons d'étudier de manière simplifiée l'évaluation de l'économie d'énergie de la programmation annuelle du réseau de distribution d'eau chaude et d'eau froide.

### 6.5.1 Proposition de loi de contrôle central pour un système 4 tubes

La période de climatisation peut être définie simplement comme suit : elle commence quand le besoin de froid admet une valeur non nulle et se termine quand ce besoin devient nul. De la même manière, la saison de chauffage peut être définie.

### 6.5.2 Sélection d'une technique de modélisation

Dans cette partie nous utilisons un modèle d'enveloppe de type R-C analogue à celui présenté au chapitre 5, paragraphe 5.2.2 et utilisé dans l'outil [Simaudit] présenté au chapitre 5, paragraphe 5.3. Ce modèle est rapide et simple d'utilisation pour notre proposition de loi de contrôle.

### 6.5.3 Présélection des facteurs de sensibilité

Nous proposons de rechercher la valeur d'un indicateur pour une typologie de bâtiment, le bâtiment de Type 3, c'est-à-dire un bâtiment de faible surface (1000 m<sup>2</sup>) et pour lequel l'équipe d'exploitation n'est présente que ponctuellement. Nous proposons également d'étudier la sensibilité de l'indicateur pour une variation d'année en année des conditions extérieures.

Nous venons ainsi de présélectionner des facteurs de sensibilité.

### 6.5.4 Evaluation de l'indicateur pour un bâtiment de Type 3

L'évolution temporelle du besoin simulée par l'outil permet de déterminer arbitrairement une saison de chauffage et de rafraîchissement (Figure 6-7 et Tableau 6-7) propre à un climat et à un bâtiment. Sur la Figure 6-7, les lignes verticales rouges marquent la fin et le début de la saison de chauffage et les lignes bleues marquent le début et la fin de la saison de rafraîchissement.

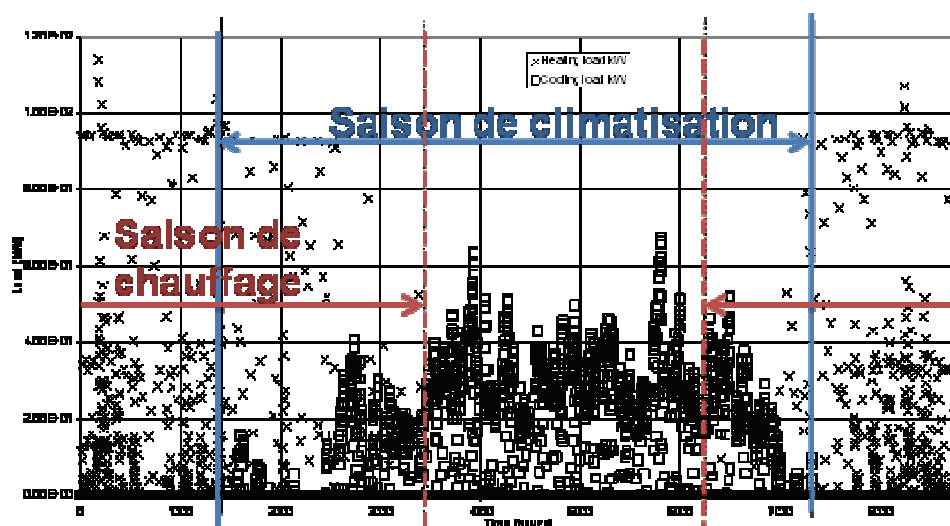


Figure 6-7 Evolution temporelle du besoin de chauffage et de climatisation

Arrêt chauffage (h)	3440
Marche chauffage (h)	6392
Arrêt climatisation (h)	7313
Marche climatisation (h)	1456

Tableau 6-7 Période de chauffage et de climatisation

Sans limiter les besoins, il est possible d'établir un contrôle du mode été/hiver pour ce bâtiment et ce fichier météorologique<sup>22</sup>.

Le temps de fonctionnement ( $t_{marche}$ ) étant estimé, l'indicateur  $E_{\%}$  s'écrit :

$$E_{\%} = 1 - \frac{t_{marche}}{8760}$$

Ainsi l'économie d'énergie peut être estimée à l'aide de cette relation et de la connaissance de la puissance des pompes utilisées.

Dans ce cas,  $E_{\%}$  est égale à 33%.

#### 6.5.5 Analyse de la sensibilité des facteurs de différenciation sur l'indicateur

Nous analysons dans cette partie l'impact de la sensibilité de certains **facteurs de différenciation** sur notre indicateur de fonctionnement. Pour réaliser cette étude nous examinons l'impact de fichiers météorologiques réels pour le climat de Paris pour les années 2000, 2001, 2002, 2003 sur notre indicateur. La référence est le fichier météorologie de METEONORM.

	Année				
	Référence	2000	2001	2002	2003
Marche climatisation (h)	1456	1936	1791	780	1623
Arrêt climatisation (h)	7313	7170	7338	7338	7841
Temps de fonctionnement (h)	5857	5234	5547	6558	6218
Economie d'énergie %	33,1%	40%	37%	25%	29%
Economie d'énergie moyenne %	32,8%				

Tableau 6-8 Impact du climat réel sur les économies d'énergie

La différence entre l'économie d'énergie moyenne pour l'année 2003 et celle calculée à partir d'une année typique est très faible.

Cependant, des écarts notables peuvent être constatés entre les années 2000 à 2003, jusqu'à 15% entre 2000 et 2003.

#### 6.5.6 Synthèse des analyses de sensibilité : développement d'un outil d'évaluation basé sur des ratios

L'opérateur peut choisir des dates spécifiques pour effectuer la mise à l'arrêt du conditionnement d'air. En effet, l'intérêt d'un exploitant peut être de pouvoir utiliser une stratégie simple pour définir une date d'arrêt ou de marche c'est à dire quelques soient les conditions extérieures. Ainsi il peut programmer contractuellement son déplacement, ce qui est vraisemblablement le cas pour un bâtiment de faible taille.

Partant de ces constations, nous avons proposé, au paragraphe 6.5.1, une méthode permettant de déterminer des dates de mise en marche et d'arrêt du système de chauffage et de climatisation. Ces dates pourraient être directement utilisées si le bâtiment correspond à la description du bâtiment de type 3 et pour le climat de Paris. Pour l'arrêt saisonnier des auxiliaires et groupe de production, l'index moyen établi pour le bâtiment de type 3, est un nombre d'heure de fonctionnement s'élevant à 5808 heures

<sup>22</sup> Il serait possible d'appliquer ce type de stratégie pour définir les saisons avec l'utilisation de fichiers météorologiques pour une année typique pour la saison de chauffage et de climatisation à l'aide de fichiers représentatifs pour l'année la plus froide et la plus chaude.

pour les équipements de chauffage et 5857 heures pour les équipements de climatisation.

Il est alors nécessaire de vérifier que l'adéquation entre le besoin en froid comme en chaud et la coupure annuelle des équipements est respectée et ce quelque soient les conditions météorologiques annuelles.

L'inconfort<sup>23</sup> résultant de l'utilisation de ces dates est étudié pour des données météorologiques réelles pour les années 2000 à 2003 et pour des conditions normalisées (référence). Les résultats de ces simulations sont donnés dans le tableau suivant.

Année	Année typique	2000	2001	2002	2003
Degrés heures d'inconfort été	0	0	0	0	0,09
Degrés heures d'inconfort hiver	0	0	0,86	0	0
Nombre heures d'inconfort été	0	0	0	0	3
Nombre heures d'inconfort hiver	0	0	2	0	0
Inconfort moyen °C été	-	-	-	-	0,03
Inconfort moyen °C hiver	-	-	0,43	-	-

Tableau 6-9 Inconfort généré pour une date préprogrammée

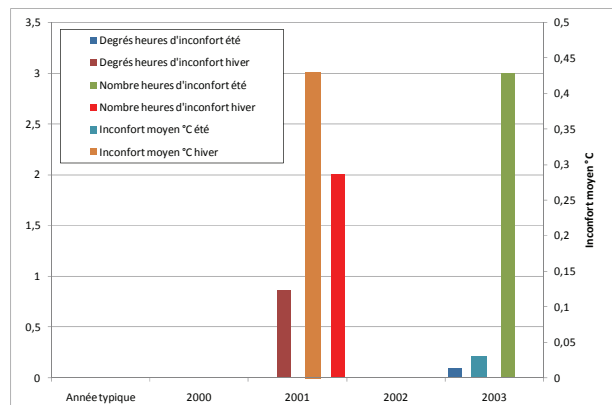


Figure 6-8 Inconfort généré pour une date préprogrammée

La méthode d'exploitation proposée engendre un inconfort nul pour les années 2000 et 2002, presque nul en 2003 et très limité en 2001.

Nous considérons donc que la stratégie proposée en 6.5.1 constitue un moyen qui n'altère pas le confort des occupants et qui optimise l'exploitation du système de distribution par rapport au besoin thermique du bâtiment et ce pour des bâtiments de faible taille et le climat de Paris. Nous proposons de retenir une unique valeur pour l'indicateur  $E_{\%}$ . Cette valeur est donnée dans l'équation suivante :

$$E_{\%} = 1 - \frac{5857}{8760} \approx 33\%$$

Une méthode d'exploitation dynamique peut être envisagée, par exemple en fonction de la température extérieure. On devrait dans ce cas chercher une corrélation qui permettrait par exemple de corriger la valeur que nous avons proposée en fonction de la température extérieure.

L'économie d'énergie s'écrit :

$$E_{kWh} = E_{\%} C_{pré}$$

<sup>23</sup> Cette étude est basée sur un critère de confort basée sur la température d'air (pour plus de détails, la définition des critères et des indicateurs est donnée au chapitre 7, paragraphe 7.1.2 et paragraphe 7.1.3)

Il est donc seulement nécessaire d'évaluer la consommation de la pompe pendant la période pré-modernisation ( $C_{pré}$ ).

#### 6.5.7 Perspectives des études effectuées

Nous avons effectué une étude préliminaire du potentiel énergétique d'amélioration de l'exploitation en introduisant une programmation annuel du fonctionnement des pompes du réseau de distribution. Nous avons alors proposé un benchmark de l'économie d'énergie pour un bâtiment de petite taille représentatif du parc.

Ce benchmark peut être utilisé pour effectuer une analyse préliminaire de plusieurs solutions d'amélioration.

Cependant, notons que des études complémentaires devraient être effectuées pour réduire l'incertitude des économies en effectuant une analyse de sensibilité de paramètres supplémentaires.

En effet, la surface vitrée, l'inertie, la présence d'un récupérateur de chaleur, la perméabilité et la température de consigne sont les principaux paramètres sensibles de la différence de la température de non chauffage et de non climatisation pour le climat de Trappes et un bâtiment de Type 1 [Cacialo08]. La variation de cette différence a indirectement un impact sur les économies d'énergie par la modification du calendrier de fonctionnement des installations.



## 6.6 Méthodes d'évaluation des économies d'énergie pour l'exploitation du débit variable

### 6.6.1 Technique globale de modélisation pour élaborer une base de données d'indicateurs

Nous n'avons pas de base de données quantifiant l'impact de la variation de débit d'eau. Nous devons élaborer celle-ci à partir d'une méthode d'évaluation dynamique nous avons sélectionnée parmi les techniques de modélisation présentées au chapitre 5, paragraphe 5.1, une approche d'évaluation par découplage du besoin thermique horaire et des équipements techniques. La méthodologie d'estimation s'articule en 3 étapes. Celles-ci sont présentées schématiquement dans la Figure 6-9.

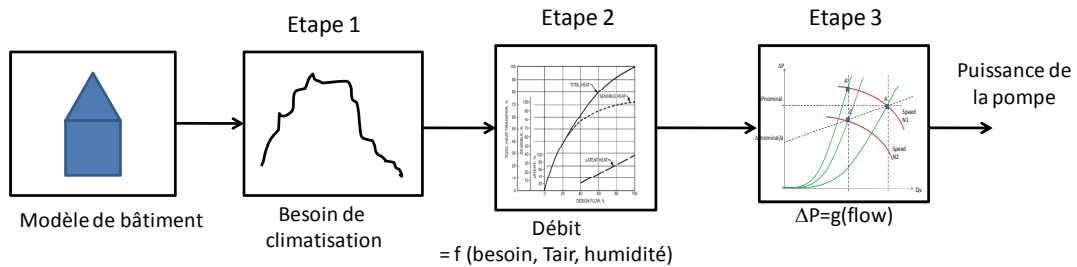


Figure 6-9 Technique de modélisation employée

La simulation d'un bâtiment est tout d'abord réalisée afin de fournir le besoin thermique horaire sensible, nécessaire pour maintenir une température intérieure fixée (étape 1).

Ce profil de besoin horaire est utilisé en entrée d'un modèle simplifié d'échangeur de chaleur (étape 2). Un solveur d'équations permet de calculer le débit en fonction de la température intérieure.

Une loi de pression/débit permet de définir la stratégie de régulation adoptée et ainsi connaître la puissance de la pompe.

Pour cette technique de modélisation, l'indicateur ( $E_{\%}$ ) est calculée par différence avec la consommation d'une pompe à débit fixe ( $C_{constant}$ ) fonctionnant aux heures pour lesquelles le besoin est non nul, de celle estimée ( $C_{VSD}$ ) après amélioration, normalisée par la consommation initiale de la pompe.

$$E_{\%} = 1 - \frac{C_{VSD}}{C_{constant}}$$

Nous souhaitons examiner l'impact des différents facteurs de diversité sur cette économie d'énergie.

Cette approche d'évaluation, par découplage du besoin thermique et des équipements, associée à l'indicateur  $E_{\%}$  nous permet d'étudier les facteurs de diversité du parc de bâtiment et les facteurs de diversité techniques **indépendants de ceux du parc** (paragraphe 6.6.5). Dans un second temps (paragraphe 6.6.6), les facteurs de diversité technique des équipements **dépendant des facteurs de diversité du parc** peuvent alors être combinés aux précédents. Enfin dans un troisième temps, nous proposons d'examiner les impacts des facteurs de différenciation (paragraphe 6.6.8).

### 6.6.2 Présélection des facteurs sensibles ayant un impact potentiel sur l'indicateur

#### 6.6.2.1 Présélection de bâtiments typiques : facteur de diversité du parc de bâtiments

Pour notre étude, nous avons retenu quatre zones climatiques (1 à 4) et la typologie de bâtiment constituée de cinq types de bâtiment représentatifs du parc de bureau français. Les différentes informations relatives à la diversité du parc sont celles présentées au paragraphe 6.4.2.

#### 6.6.2.2 Présélection des modèles de systèmes : facteurs de diversité techniques

Pour les propriétés thermiques de l'échangeur de chaleur, une étude pourrait être réalisée pour obtenir par exemple la puissance moyenne d'un ventilo-convecteur ou d'une CTA « typique » par un historique des ventes de matériel et ainsi établir deux modèles « typiques ». Malheureusement ces chiffres ne sont pas publiés. **Nous limitons notre étude aux systèmes de type ventilo-convecteurs.** Connaissant le besoin thermique nous calculerons le débit d'eau nécessaire grâce au modèle simplifié de [Morisot00] (voir chapitre 5 paragraphe 5.7), qui permet d'utiliser soit des données constructeur soit des mesures expérimentales.

Pour la pompe, nous retenons un modèle d'efficacité hydraulique moyen [Sfeir05] et le modèle de correction d'efficacité à charge partielle du moteur [Sfeir05] (voir paragraphe 6.4.3).

Conformément à la définition  $E_{\%}$  le rendement nominal du moteur n'a pas d'influence sur  $E_{\%}$  sauf si on envisage le remplacement du bloc moteur. Dans ce dernier cas on se référera au paragraphe 6.4.3.

Le réseau d'eau glacée, comportant les éléments techniques nécessaires à la variation de débit d'eau glacée, doit être modélisé à l'aide de composants techniques supplémentaires. Afin d'élaborer ce modèle complet, il est nécessaire de définir les **modèles supplémentaires représentatifs du système de pompage à débit variable : le variateur de vitesse, et les stratégies de contrôle.**

**Les stratégies de contrôle de variation de vitesse** qui sont utilisées dans notre modélisation, sont celles présentées au chapitre 1 et rappelées au paragraphe 6.1.1. La relation issue de chacune des stratégies de contrôle permet ainsi de déterminer la pression du réseau d'eau en fonction du débit d'eau. La puissance hydraulique de la pompe est alors calculée.

Plusieurs modèles d'efficacité hydraulique d'une pompe sont disponibles dans [Sfeir05] et sont définies au chapitre 5. Nous retenons un modèle d'efficacité moyenne.

Pour le variateur de vitesse, une courbe de rendement en fonction de la vitesse de rotation issue de [ASHRAES04], a été extrapolée par [Sfeir05]. Cette courbe est présentée à la Figure 5-13.

#### 6.6.2.3 Lien entre la diversité du parc immobilier et la diversité technique des équipements

Nous rappelons que **les unités terminales sont dimensionnées pour répondre au besoin thermique** en chaud comme en froid (voir chapitre 1, paragraphe 1.9.3.1). Le débit d'eau du réseau secondaire peut alors être estimé à l'aide du débit nominal de chacune des unités.

#### 6.6.2.4 Présélection des modèles pour expliciter les facteurs de diversité temporelle

Différents facteurs à variation aléatoire doivent être pris en compte pour améliorer la modélisation de l'impact de la variation de vitesse :

- **Le profil d'usage intermittent** du système de climatisation en fonction de l'usage des zones thermiques du bâtiment
- **Le temps de réponse du régulateur**
- **L'action de l'occupant sur le système de ventilation**

Nous avons supposé trois modèles déterministes afin de prendre en compte ces facteurs temporels :

- **Un profil typique d'occupation** est utilisé pour chacune des zones de bureaux (zone 1 et zone 2) et pour chacune des salles de conférences que comprend

notre bâtiment. Les profils d'occupation sont invariants pour chacun des types d'usage dans notre étude et sont ceux de [IEA48]. Ces profils sont présentés à la Figure 6-5 et à la Figure 6-6.

- **Deux modèles de régulateur** (T.O.R. et P.I.D. idéal), introduits au chapitre 5, paragraphe 5.4.4. pour prendre en compte le temps de réponse de la régulation des vannes. Celles-ci correspondent respectivement à une ouverture binaire de la vanne (débit nul ou débit maximum), et à ouverture progressive de la vanne avec un temps de réponse minimum.
- **Deux modèles d'usage de la vitesse d'air** : une vitesse fixe et invariante ; trois vitesses automatiquement déterminés en fonction du besoin thermique de la pièce. Notons que le confort acoustique de l'utilisateur doit être amélioré avec l'introduction d'un débit automatique d'air.

Afin de rendre le temps de réponse du P.I.D. très petit devant les variations de la température intérieure et à fortiori de la charge thermique, le régulateur P.I.D. sera considéré suffisamment adapté à la zone climatisée. Cette hypothèse permet de considérer que le débit d'eau instantané traversant l'échangeur sera la valeur moyenne du débit d'eau nécessaire afin de couvrir le besoin thermique d'un pas de temps de la simulation. Pour le régulateur T.O.R. le temps d'ouverture maximale est calculée pour chaque pas de temps, la pompe débitera donc soit un débit relatif de 20% soit un débit de 100%.

#### 6.6.2.5 Récapitulatif des modèles présélectionnés

Le Tableau 6-10 synthétise les principales hypothèses utilisées.

Facteur	Diversité du parc de bâtiments			Diversité technique des équipements				Différentiation		
Modèle	Typologie de bâtiment	Climat	Charge interne	Echangeur	V.V.	Organe de pompage	Stratégie de régulation du débit d'eau	Zones climatisées	Régulateur de température intérieure	Variation de la vitesse d'air
Paramètres	5 Typologies de bâtiment (Type 1a, Type 1b, Type 1c, Type 2, Type 3)	4 fichiers météo (Paris, Turin, Stockholm, Lisbonne)	6 valeurs nominales	Modèle simplifié [Morisot00]	[Sfeir05]	Efficacité moyenne [Sfeir05]	3 Stratégies de contrôle (DP constant, DP proportionnelle, basé sur la demande)	2 bureaux & 1 salle de conférence / étage	2 types de régulateur (T.O.R. et P.I.D.)	2 types: auto à 3 vitesses, 1 vitesse unique

Tableau 6-10 Paramètres de l'étude

#### 6.6.2.6 Hypothèses supplémentaires

Un débit minimum a été introduit afin de prendre en compte le comportement réel des pompes. Ainsi lorsque le débit d'eau relatif se trouve dans ] 0% ; 20% ], on a supposé que le débit relatif est égale à 20%. La température d'entrée d'eau de l'échangeur a été supposée constante et égale à 7°C.

Afin de déterminer la vitesse de rotation de la pompe nous supposons que les lois de similitude (ou encore appelées lois de Rateau) sont respectées quelle que soit la stratégie utilisée. Nous les rappelons (voir chapitre 2, paragraphe 5.6.6) et nous supposons que le rendement hydraulique est invariant quelle que soit la vitesse de rotation :

$$\begin{cases} q_{v2} = q_{v1} \frac{N_2}{N_1} \\ \Delta P_2 = \Delta P_1 \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 \\ P_{hydrau2} = P_{hydrau1} \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^3 \\ \eta_2 = \eta_1 \end{cases}$$

Dans le paragraphe suivant nous proposons d'examiner le biais introduit par l'utilisation de la technique de modélisation simplifiée.

Nous avons supposé que le point de fonctionnement nominal de tous les équipements coïncide avec le débit nominal de l'installation. C'est-à-dire au maximum de l'efficacité hydraulique de la pompe.

Comme la vitesse de pompe pour la stratégie 1 ou bien encore la stratégie 2 est supérieure à celle estimée à l'aide de la loi de similitude (stratégie 3), et que la courbe de rendement est une fonction croissante, notre hypothèse sous estime l'indicateur  $E_{\%}$  d'énergie pour les stratégies 1 et 2.

Un exemple de rendement obtenu à l'aide de ces équations pour un moteur AC est donné pour les trois stratégies de contrôle de débit sur la Figure 6-10.

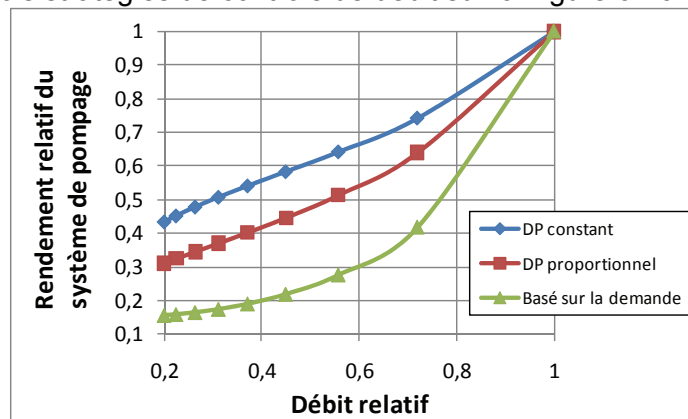


Figure 6-10 Variation du rendement en fonction du débit

Le rendement total du système de pompage est fortement réduit pour les faibles débits et donc pour les faibles charges thermiques.

### 6.6.3 Mise au point de techniques d'évaluation

Avant d'effectuer des analyses de la sensibilité des facteurs de diversité et des facteurs de différenciation, il est nécessaire de mettre au point une technique de modélisation, aussi simple que possible, permettant d'estimer la valeur d'un indicateur.

Dans ce paragraphe nous envisageons deux techniques de modélisations. Nous rappelons que l'indicateur ( $E_{\%}$ ) est calculée par différence avec la consommation d'une pompe à débit fixe ( $C_{constant}$ ) fonctionnant aux heures pour lesquelles le besoin est nul, de celle estimée ( $C_{VSD}$ ) après amélioration, normalisée par la consommation initiale de la pompe.

$$E_{\%} = 1 - \frac{C_{constant}}{C_{VSD}}$$

La technique globale de modélisation présentée en Figure 6-9 peut se développer selon une première technique afin de prendre exactement en compte l'usage des différentes zones climatisées. Nous avons schématisé cette technique à la Figure 6-11.

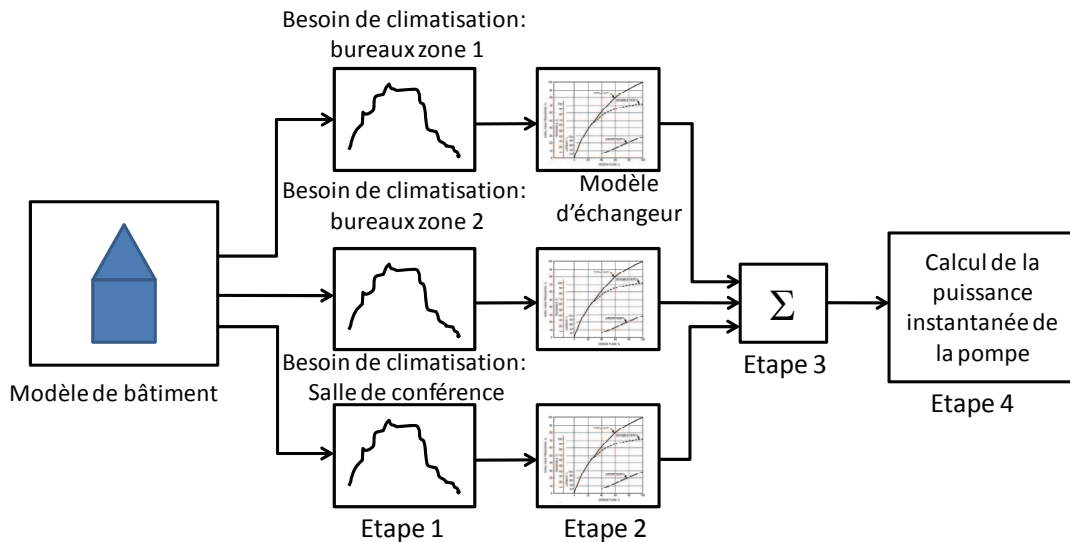


Figure 6-11 Technique de modélisation n°1

Chaque zone climatisée étant simulée (étape 1) en fonction des facteurs de diversité du parc de bâtiment (climat, typologie de bâtiment), le besoin de chaque zone permet de déterminer le débit d'eau nécessaire à chaque zone et donc des facteurs de diversité temporelle qui lui sont propres (étape 2). Ceux-ci sont sommés afin de déterminer le débit total du réseau secondaire (étape 3). Les facteurs de diversité du système permettront enfin de calculer la puissance instantanée de la pompe (étape 4). Toutes ces étapes s'effectuent pour chaque pas de temps horaire de la simulation du bâtiment et pour un besoin de climatisation non-nul.

Toutefois une technique simplifiée, présentée à la Figure 6-12, a été élaborée afin d'effectuer le post-traitement plus rapidement.

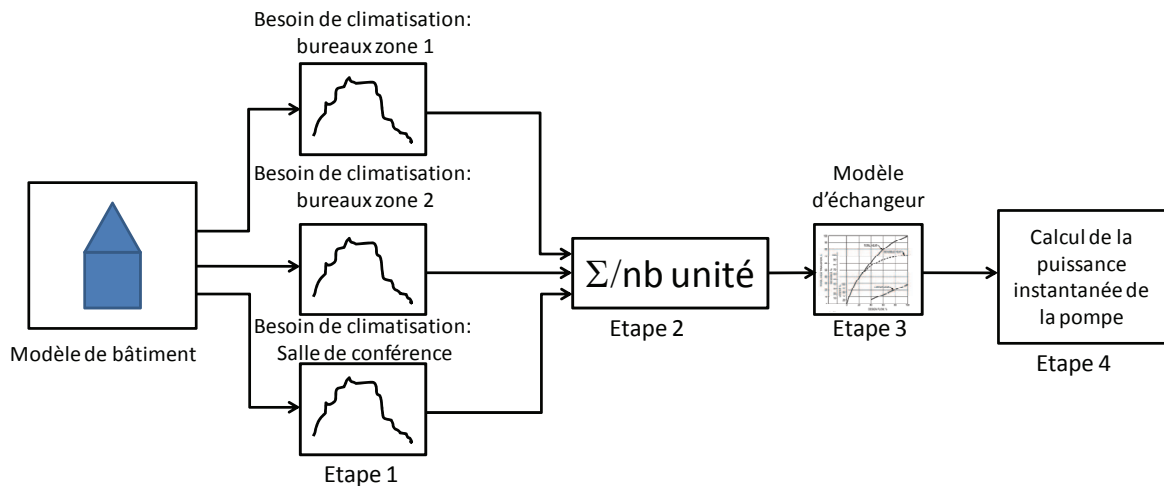


Figure 6-12 Technique de modélisation n°2

Chaque zone climatisée étant simulée (étape 1) en fonction des facteurs de diversité spatiale du bâtiment (climat, typologie de bâtiment), le besoin de chaque zone est sommé en supposant une répartition homogène du débit d'eau selon le nombre totale d'unité terminale (étape 2). Le débit d'eau nécessaire à un échangeur est alors déterminé à l'aide d'un unique modèle d'échangeur (étape 3). Les facteurs de diversité du système permettront enfin de calculer la puissance instantanée de la pompe en fonction du nombre d'unité terminale (étape 4). Les étapes 1 à 3 s'effectuent à chaque pas de temps horaire et pour un besoin de climatisation non nul. Nous avons également simplifié le calcul de l'étape 4 en introduisant 20 classes de débit relatif. Pour chacun d'eux, un temps de fonctionnement est calculé pour chaque débit non nul, ainsi que la puissance associée.

Pour cette technique on calcule donc l'indicateur de performance à l'aide de l'équation suivante :

$$E_{\%} = \sum_{i=1}^{20} \left( 1 - \frac{t_i}{t} \frac{P_{elec\ i}}{P_{elec\ nom}} \right) = \sum_{i=1}^{20} \left( 1 - \frac{t_i}{t} \frac{\eta_{tot}}{\eta_{tot\ i}} \right)$$

#### 6.6.4 Sélection d'une technique de modélisation

La simulation du bâtiment de Type 1c a été effectuée selon les deux techniques présentée ci-dessus pour le climat de Paris et pour le bâtiment de type 3.

Un traitement informatique a été réalisé à l'aide de la répartition temporelle cumulée (sur l'axe de gauche des ordonnées) pour les 20 classes de débit (axe des abscisses). La Figure 6-13 reprend les résultats de cette analyse. Nous avons reporté le biais (sur l'axe de droite des ordonnées) pour comparer la méthode simplifiée à la méthode « complète ».

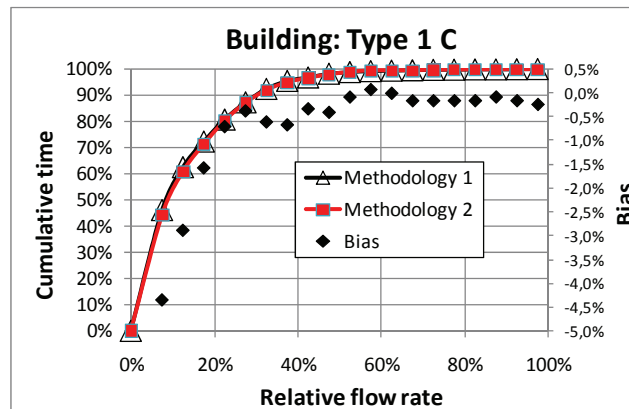


Figure 6-13 Temps de fonctionnement cumulé pour le Climat de Paris et bâtiment type 1C, extrait de [Caillet10]

Le biais introduit par la technique simplifiée (technique n°2) est relativement restreint au dessus de 20% de débit relatif (de l'ordre de 0.5%).

L'application de l'étape 4 permet de déterminer l'économie d'énergie. Le Tableau 6-11 reprend les résultats de ce calcul.

	Strategy 1		Strategy 2		Strategy 3	
	Energy savings %	Bias %	Energy savings %	Bias %	Energy savings %	Bias %
Methodology 2 (path 1)	54,8%	-0,5%	67,2%	-0,5%	83,3%	-0,5%
Methodology 1 (path 2)	55,1%		67,5%		83,7%	

Tableau 6-11 type 1C climat de paris, extrait de [Caillet10]

Pour chacune des stratégies de régulation du débit d'eau, le foisonnement des usages de la zone climatisée a très peu d'influence sur l'indicateur  $E_{\%}$ .

Dans le but d'avoir une estimation de l'indicateur  $E_{\%}$  rapide mais de qualité, nous utilisons dans la suite de notre travail la technique de modélisation n°2, **la technique simplifiée** (voir Figure 6-12).

#### 6.6.5 Etude de sensibilité de la diversité du parc de bâtiments : impact de la typologie de bâtiment et de la zone climatique

Dans ce paragraphe nous étudions l'impact des facteurs de **diversité du parc** (la typologie de bâtiment, le climat) **et ce en prenant le soin de sélectionner des facteurs de diversité constants pour les équipements** (le type de stratégie de régulation du débit d'eau). Nous ne prenons pas donc pas en compte le facteur de correction de

l'efficacité du moteur à charge partielle qui dépend indirectement de la typologie de bâtiment.

Les trois tableaux ci-dessous résument les résultats obtenus à l'aide de notre campagne de simulation numérique.

	$\Delta P$ constant										
Bâtiment	Type 3				Type 2	Type 1a	Type 1b	Type 1c			
Climat	Paris	Stockholm	Turin	Lisbonne	Paris	Paris	Paris	Paris	Stockholm	Turin	Lisbonne
Economies d'énergie	57%	59%	57%	59%	58%	59%	58%	57%	58%	57%	57%

Tableau 6-12  $E_{\%}$  pour la stratégie différentiel de pression constant

Pour la stratégie à différentiel de pression constant, l'indicateur  $E_{\%}$  est évalué entre 57% à 59%, la typologie des bâtiments, comme le climat, ont un impact limité sur cet indicateur.

	$\Delta P$ proportionnel										
Bâtiment	Type 3				Type 2	Type 1a	Type 1b	Type 1c			
Climat	Paris	Stockholm	Turin	Lisbonne	Paris	Paris	Paris	Paris	Stockholm	Turin	Lisbonne
Economies d'énergie	74%	75%	73%	75%	74%	75%	74%	74%	75%	73%	74%

Tableau 6-13  $E_{\%}$  pour la stratégie différentiel de pression proportionnel

Pour la stratégie à différentiel de pression proportionnel, l'indicateur  $E_{\%}$  est évalué entre 73% à 75%, la typologie des bâtiments, comme le climat, ont un impact limité sur cet indicateur.

	Basé sur la demande										
Bâtiment	Type 3				Type 2	Type 1a	Type 1b	Type 1c			
Climat	Paris	Stockholm	Turin	Lisbonne	Paris	Paris	Paris	Paris	Stockholm	Turin	Lisbonne
Economies d'énergie	97%	98%	97%	98%	98%	98%	98%	97%	98%	97%	97%

Tableau 6-14  $E_{\%}$  pour la stratégie basée sur la demande

Pour la stratégie basée sur la demande, l'indicateur  $E_{\%}$  est évalué entre 97% à 98%, la typologie des bâtiments, comme le climat, ont un impact limité sur cet indicateur.

Les différents climats pour chaque type de bâtiments ont un impact limité sur l'indicateur  $E_{\%}$  et pour chacune des méthodes de contrôle. Pour chacune des stratégies de contrôle, l'indicateur  $E_{\%}$  est approximativement la même quel que soit le type de bâtiment et de climat. Toutefois la stratégie de régulation a un impact important sur cet indicateur.

#### 6.6.6 Etude de sensibilité des composants techniques : impact du coefficient à charge partielle du moteur

**Afin d'analyser l'impact exact du facteur de correction à charge partielle de la pompe**, un calcul, analogue au précédent, a permis d'obtenir les résultats des tableaux suivants.

	$\Delta P$ constant										
Bâtiment	Type 3				Type 2	Type 1a	Type 1b	Type 1c			
Climat	Paris	Stockholm	Turin	Lisbonne	Paris	Paris	Paris	Paris	Stockholm	Turin	Lisbonne
Economies d'énergie	48%	49%	47%	49%	54%	56%	55%	55%	55%	54%	55%

Tableau 6-15  $E_{\%}$  pour la stratégie différentiel de pression constant

Pour la stratégie à différentiel de pression constant, l'indicateur  $E_{\%}$  est évalué entre 47% à 55%, la typologie des bâtiments a un impact non négligeable sur cet indicateur.



Cependant pour une typologie de bâtiment, l'impact du climat sur l'indicateur  $E_{\%}$  est limité. Par exemple pour le bâtiment de Type 3, cet indicateur varie entre 47% et 49%.

	$\Delta P$ proportionnel										
Bâtiment	Type 3				Type 2	Type 1a	Type 1b	Type 1c			
Climat	Paris	Stockholm	Turin	Lisbonne	Paris	Paris	Paris	Paris	Stockholm	Turin	Lisbonne
Economies d'énergie	61%	62%	60%	62%	65%	68%	68%	67%	68%	67%	67%

Tableau 6-16  $E_{\%}$  pour la stratégie différentiel de pression proportionnel

Pour la stratégie à différentiel de pression proportionnel, l'indicateur  $E_{\%}$  est évalué entre 60% à 68%, la typologie des bâtiments a un impact non négligeable sur cet indicateur. Cependant pour une typologie de bâtiment, l'impact du climat sur l'indicateur  $E_{\%}$  est limité. Par exemple pour le bâtiment de Type 3, cet indicateur varie entre 60% et 62%.

	Basé sur la demande										
Bâtiment	Type 3				Type 2	Type 1a	Type 1b	Type 1c			
Climat	Paris	Stockholm	Turin	Lisbonne	Paris	Paris	Paris	Paris	Stockholm	Turin	Lisbonne
Economies d'énergie	78%	79%	78%	79%	80%	84%	84%	83%	84%	83%	84%

Tableau 6-17  $E_{\%}$  pour la stratégie basée sur la demande

Pour la stratégie basée sur la demande, l'indicateur  $E_{\%}$  est évalué entre 78% à 84%, la typologie des bâtiments a un impact non négligeable sur cet indicateur. Cependant pour une typologie de bâtiment, l'impact du climat sur l'indicateur  $E_{\%}$  est limité. Par exemple pour le bâtiment de Type 3, cet indicateur varie entre 78% et 79%.

Le facteur de correction à charge partielle du moteur a un impact important sur l'économie d'énergie. De plus, la typologie du bâtiment semble avoir un impact sur l'économie d'énergie. Mais cette différence s'explique par le dimensionnement du système de pompage. En effet conformément à la figure suivante, le facteur de correction du rendement moteur à charge partielle et donc indirectement la puissance thermique échangée, dépend de la gamme de puissance nominale du moteur. Autrement dit, pour un moteur à faible puissance équipant un bâtiment de petite taille (Type 3), les économies d'énergie réalisées à faibles charges sont plus faibles que celles réalisées pour un bâtiment de grande taille (Type 1c) équipé d'un moteur puissant.

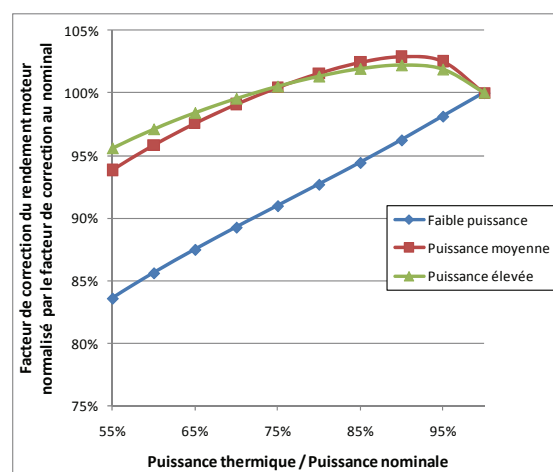


Figure 6-14 Courbe puissance thermique normalisée / facteur de correction normalisé

Ainsi le facteur corrigeant l'efficacité du moteur à charge partielle doit être prise en compte afin d'évaluer l'économie d'énergie.



### 6.6.7 Synthèse préliminaire des facteurs de diversité du parc et des équipements

Au paragraphe 6.6.5, nous avons mis en évidence que la typologie de bâtiment a un impact non négligeable sur les économies d'énergie. Cependant nous avons également montré que la cause de cette différence provient du facteur de correction du moteur a une influence non négligeable sur cette économie. Le dimensionnement de la pompe est indirectement la cause de cette différence. En effet, plus la charge thermique maximale est importante, plus la puissance nominale hydraulique est importante et donc plus la puissance mécanique nominale du moteur est importante et donc plus les pertes à charge partielle sont faibles. Chacune des typologies de bâtiment correspond à une catégorie de puissance (voir Tableau 6-18). Nous reviendrons sur ce point au paragraphe 6.7.5.

Typologie de bâtiment	Puissance nominale à l'arbre moteur
Type 3	Inférieure à 750 W
Type 1 (a ou b ou c) ou Type 2	Supérieure à 750 W

Tableau 6-18 Correspondance des catégories de puissance du moteur / typologie des bâtiments

Notons également que le climat a une influence négligeable pour une catégorie de bâtiment donnée. Dans ce cas, pour une typologie donnée, malgré des différences de dimensionnement, l'impact de la correction à charge partielle est négligeable. En effet la catégorie de puissance du moteur reste inchangée.

La sensibilité de la typologie du bâtiment (taille, surface vitrée, ...) et du climat est faible devant les facteurs de diversité des équipements indépendants de la typologie. Cependant cette typologie influence indirectement la puissance du moteur. Par conséquent, la typologie impacte le rendement à charge partielle du moteur.

### 6.6.8 Etude de sensibilité de facteurs de différenciation

#### 6.6.8.1 Etude de sensibilité de la charge interne

Nous avons réalisé une étude de sensibilité de la charge interne due aux équipements pour des valeurs comprise entre 10 W/m<sup>2</sup> et 30 W/m<sup>2</sup>. Les résultats sont présentés dans le graphique ci-dessous pour le bâtiment de type 3 et pour le climat de Paris.

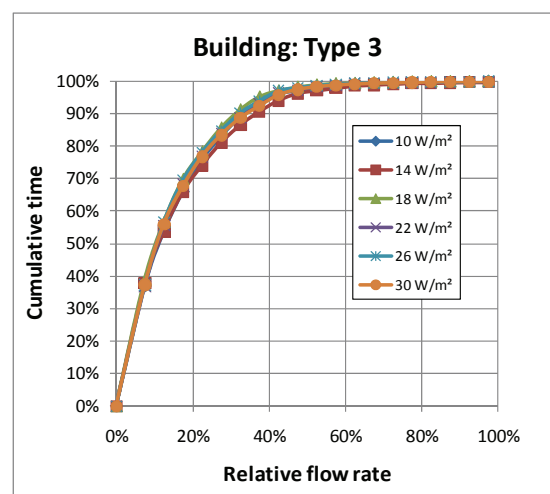


Figure 6-15 Temps cumulé de fonctionnement de la pompe en fonction du débit relatif

L'influence de la charge interne est très faible sur la répartition temporelle cumulée du débit et donc indirectement sur l'économie d'énergie. En effet le dimensionnement de l'installation est effectué en fonction de la charge thermique maximale de l'installation.

### 6.6.8.2 Etude de sensibilité de la dynamique de la régulation

Dans ce paragraphe nous étudions l'impact du facteur de différentiation relatif au régulateur de la température d'air. Celui-ci peut être de basse qualité et faire osciller la vanne d'eau dans les positions extrêmes (ouverture et fermeture) plusieurs fois dans une heure, nous nommons ce cas action binaire. Notons que cet effet de pompage de la vanne peut être dû à une erreur de dimensionnement de la vanne de régulation (voir chapitre 1, paragraphe 1.9.5.1). Mais le régulateur peut parfaitement ajuster l'ouverture de la vanne d'eau au besoin nécessaire, nous désignons ce type de contrôle PID optimal. Ces deux cas représentent des cas extrêmes de fonctionnement.

Pour illustrer la conséquence de la dynamique de la régulation, la simulation des différents bâtiments a été effectuée selon la technique 2, pour les climats. Les résultats sont présentés dans le Tableau 6-19, Tableau 6-20 et Tableau 6-21.

	$\Delta P$ constant										
Bâtiment	Type 3				Type 2	Type 1a	Type 1b	Type 1c			
Climat	Paris	Stockholm	Turin	Lisbonne	Paris	Paris	Paris	Paris	Stockholm	Turin	Lisbonne
PID optimal	48%	49%	47%	49%	54%	56%	55%	55%	55%	54%	55%
T.O.R.	34%	37%	33%	38%	39%	41%	41%	40%	42%	38%	40%

Tableau 6-19 Effet de la dynamique de la régulation sur  $E_{\%}$  pour la stratégie différentiel de pression constant

Pour la stratégie à différentiel de pression constant, l'indicateur  $E_{\%}$  est évalué entre 33% et 42% pour une régulation à action binaire. Par exemple pour un bâtiment de Type 3 et le climat de Lisbonne, l'index passe de 49% à 38% soit un écart relatif de 22%. La dynamique de la régulation a un impact non négligeable sur l'indicateur  $E_{\%}$ .

L'impact du climat pour une typologie donnée peu atteindre un écart relatif de 13% pour le bâtiment de Type 3 ( $E_{\%} = 33\%$  pour le climat de Turin et  $E_{\%} = 38\%$  pour le climat de Lisbonne).

	$\Delta P$ proportionnel										
Bâtiment	Type 3				Type 2	Type 1a	Type 1b	Type 1c			
Climat	Paris	Stockholm	Turin	Lisbonne	Paris	Paris	Paris	Paris	Stockholm	Turin	Lisbonne
PID optimal	61%	62%	60%	62%	65%	68%	68%	67%	68%	67%	67%
T.O.R.	43%	46%	42%	47%	47%	50%	49%	49%	51%	47%	48%

Tableau 6-20 Effet de la dynamique de la régulation sur  $E_{\%}$  pour la stratégie différentiel de pression proportionnel

Pour la stratégie à différentiel de pression proportionnel, l'indicateur  $E_{\%}$  est évalué entre 42% et 51% pour une régulation à action binaire. Par exemple pour un bâtiment de Type 3 et le climat de Lisbonne, l'index passe de 62% à 47% soit un écart relatif de 24%. La dynamique de la régulation a un impact non négligeable sur l'indicateur  $E_{\%}$ . L'impact du climat pour une typologie donnée peu atteindre un écart relatif de 10% pour le bâtiment de Type 3 ( $E_{\%} = 42\%$  pour le climat de Turin et  $E_{\%} = 47\%$  pour le climat de Lisbonne).

	Basé sur la demande										
Bâtiment	Type 3				Type 2	Type 1a	Type 1b	Type 1c			
Climat	Paris	Stockholm	Turin	Lisbonne	Paris	Paris	Paris	Paris	Stockholm	Turin	Lisbonne
PID optimal	78%	79%	78%	79%	80%	84%	84%	83%	84%	83%	84%
T.O.R.	68%	73%	66%	74%	70%	72%	71%	70%	73%	67%	69%

Tableau 6-21 Effet de la dynamique de la régulation sur  $E_{\%}$  pour la stratégie basée sur la demande

Pour la stratégie basée sur la demande, l'indicateur  $E_{\%}$  est évalué entre 66% et 74% pour une régulation à action binaire. Par exemple pour un bâtiment de Type 3 et le climat de Paris, l'index passe de 78% à 68% soit un écart relatif de 12%. La dynamique de la régulation a un faible impact sur l'indicateur  $E_{\%}$ . L'impact du climat pour une typologie donnée peu atteindre un écart relatif de 10% pour le bâtiment de Type 3 ( $E_{\%} = 66\%$  pour le climat de Turin et  $E_{\%} = 74\%$  pour le climat de Lisbonne) et 8% pour le bâtiment de Type 1C.

Le climat a un impact limité sur l'économie d'énergie comparativement à la dynamique de régulation pour chacune des stratégies de contrôle. Il est donc nécessaire de prendre en compte la dynamique de la régulation pour ces deux stratégies.

Pour la stratégie basée sur la demande, le climat et la dynamique de régulation ont une influence comparable et limitée sur l'économie d'énergie.

### 6.6.8.3 Etude de sensibilité de l'interaction de l'occupant sur le débit d'air pour des ventilo-convecteurs

Dans ce paragraphe nous étudions donc **l'impact du comportement temporel de l'occupant** qui laisse fonctionner à plein régime son ventilo-convecteur ou qui laisse ajuster automatiquement la vitesse du ventilateur en fonction du besoin. Cette dernière régulation permet de réduire les nuisances sonores de l'appareil et donc d'augmenter le confort acoustique de l'occupant. Nous étudions donc l'impact du facteur de diversité temporel relatif à l'usage du ventilo-convecteur par la mise en place d'un régulateur automatique de la vitesse d'air. Comme les équipements de régulation possédant ce type d'automatisme sont, pour la plupart, équipés de dispositif de régulation de débit d'eau performant nous écartons de notre étude la combinaison régulateur à action binaire/variation de débit d'air.

	$\Delta P$ constant										
Bâtiment	Type 3				Type 2	Type 1a	Type 1b	Type 1c			
Climat	Paris	Stockholm	Turin	Lisbonne	Paris	Paris	Paris	Paris	Stockholm	Turin	Lisbonne
PID optimal	43%	45%	43%	46%	50%	51%	51%	50%	52%	49%	50%

Tableau 6-22 Effet de l'occupant sur  $E_{\%}$  pour la stratégie différentiel de pression constant

L'action de l'occupant sur le système de régulation de la vitesse d'air à un impact non négligeable sur  $E_{\%}$  pour la stratégie différentiel de pression constant. Par exemple, pour le climat de Paris et le bâtiment de Type 3,  $E_{\%}$  passe de 48% à 43%.

	$\Delta P$ proportionnel										
Bâtiment	Type 3				Type 2	Type 1a	Type 1b	Type 1c			
Climat	Paris	Stockholm	Turin	Lisbonne	Paris	Paris	Paris	Paris	Stockholm	Turin	Lisbonne
PID optimal	56%	57%	55%	58%	57%	63%	62%	62%	64%	61%	62%

Tableau 6-23 Effet de l'occupant sur  $E_{\%}$  pour la stratégie différentiel de pression proportionnel

L'action de l'occupant sur le système de régulation de la vitesse d'air à un impact non négligeable sur  $E_{\%}$  pour la stratégie différentiel de pression proportionnel. Par exemple, pour le climat de Paris et le bâtiment de Type 3,  $E_{\%}$  passe de 61% à 56%.

	Basé sur la demande										
Bâtiment	Type 3				Type 2	Type 1a	Type 1b	Type 1c			
Climat	Paris	Stockholm	Turin	Lisbonne	Paris	Paris	Paris	Paris	Stockholm	Turin	Lisbonne
PID optimal	73%	75%	73%	76%	75%	79%	79%	79%	80%	78%	79%

Tableau 6-24 Effet de l'occupant sur  $E_{\%}$  pour la stratégie basée sur la demande

L'action de l'occupant sur le système de régulation de la vitesse d'air à un impact non négligeable sur  $E_{\%}$  pour la stratégie basée sur la demande. Par exemple, pour le climat de Paris et le bâtiment de Type 3,  $E_{\%}$  passe de 78% à 73%.

L'introduction d'une régulation automatique du débit d'air modifie l'économie d'énergie quelle que soit la stratégie ou le climat. En effet à faible charge, le débit d'eau doit être plus important pour compenser la diminution du débit d'air.

#### 6.6.9 Synthèse des analyses de sensibilité : développement de méthodes d'évaluation

Les différentes études de sensibilités menées dans les paragraphes 6.6.5, 6.6.8 permettent de sélectionner les paramètres ayant un impact significatif sur l'économie d'énergie.

Tout d'abord, nous proposons de retenir les différentes catégories de puissance pour représenter les facteurs de diversité du parc de bâtiments et des équipements cette étude (voir la synthèse du paragraphe 6.6.7.)

Au paragraphe 6.6.8.1, nous avons mis en évidence que la charge interne a une influence négligeable sur les économies d'énergie.<sup>24</sup>

Aux paragraphes 6.6.8.2 et 6.6.8.3, nous avons mis en évidence que la dynamique du régulateur intérieur et que la régulation du ventilateur intérieur a un impact non négligeable sur la vitesse d'air.

Les paramètres retenus pour créer la base de données d'un indicateur sont donc ceux exposés dans le Tableau 6-25.

Facteur	Diversité technique		Différentiation	
Modèle	Puissance du moteur à l'arbre	Stratégie de régulation du débit d'eau	Régulateur de température intérieure	Variation de la vitesse d'air
Paramètre	> 750 W	$\Delta P$ constant	T.O.R.	Auto (3 vitesses)
		$\Delta P$ proportionnel		
	< 750 W	Basé sur la demande	P.I.D	1 vitesse

Tableau 6-25 Facteurs sensibles retenus

Pour chacune des typologies de bâtiment du Tableau 6-15, Tableau 6-16, Tableau 6-17 nous avons extrait le minimum de  $E_{\%VSD}$  en différenciant la technique de régulation du variateur de vitesse et la catégorie de puissance du moteur. Cette opération nous a permis de synthétiser une base de données d'indicateur  $E_{\%VSD}$  pour une régulation de type P.I.D. optimale. D'une manière analogue nous avons traité les informations du Tableau 6-19, Tableau 6-20, Tableau 6-21 pour élaborer une base de données de l'indicateur  $E_{\%VSD}$  pour une régulation de type T.O.R.. L'ensemble de ces informations est donné au Tableau 6-26.

<sup>24</sup> La catégorie de puissance reste inchangée pour notre domaine de variation de la charge interne

		Puissance nominale à l'arbre moteur	
		Inférieure à 750 W	Supérieure à 750 W
DP constant	T.O.R.	33%	39%
	P.I.D	47%	54%
DP proportionnel	T.O.R.	42%	47%
	P.I.D	60%	65%
Basé sur la demande	T.O.R.	66%	67%
	P.I.D	78%	80%

Tableau 6-26 Synthèse de l'indicateur  $E_{\%VSD}$  pour des ventilo-convecteurs à une vitesse d'air

D'une manière analogue nous avons traité les informations du Tableau 6-22, du Tableau 6-23 et du Tableau 6-24 pour élaborer une base de données d'indicateur  $E_{\%VSD}$  et ce pour des ventilo-convecteurs à trois vitesses d'air.

		Puissance nominale à l'arbre moteur	
		Inférieure à 750 W	Supérieure à 750 W
DP constant		43%	49%
DP proportionnel		55%	57%
Basé sur la demande		73%	75%

Tableau 6-27 Synthèse de l'indicateur  $E_{\%VSD}$  pour des ventilo-convecteurs à 3 vitesses avec régulation automatique

Par exemple, pour des ventilo-convecteurs à une vitesse d'air et un moteur de puissance à l'arbre de 1000 W, les économies d'énergie estimées pour un contrôle à différentiel de pression proportionnel sont comprises dans l'intervalle [47% ; 65%].

La mise en place de la variation de vitesse à un certain coût. Afin d'accroître la rentabilité du projet de modernisation du système de distribution, il est envisageable de **remplacer le système de pompage par un système plus efficace**. Il est possible d'agir sur **la pompe** elle-même ainsi que sur **le moteur**. Nous proposons au lecteur un benchmark permettant de **juger l'efficacité du système de pompage** existant et ainsi déterminer si le remplacement du moteur ou du corps de pompe et de la roue est envisageable.

**La réduction des pertes mécaniques et électromagnétiques**, par une réduction des frottements du rotor et une conception améliorée du bobinage. Les rendements nominaux des principales gammes technologiques disponibles sont donnés à la Figure 5-11, et définis au chapitre 5, paragraphe 5.6.3.

**La réduction des pertes hydrauliques** par une conception améliorée du corps de pompe et de la roue permet d'améliorer l'efficacité hydraulique. Trois modèles typiques sont proposés dans [Sfeir05]. Nous rappelons que nous avons utilisé une pompe d'efficacité moyenne dans le calcul de  $E_{\%}$ .

Il est donc envisageable d'introduire le rendement du moteur, d'une part pour calculer l'économie relative et d'autre part pour évaluer la consommation de la pompe à vitesse constante existante.

Le développement d'un outil d'évaluation doit donc pouvoir prendre en compte la possibilité d'une action complémentaire permettant l'amélioration de l'efficacité technique passant d'une efficacité pré-modernisation ( $\eta_{pré}$ ) à une efficacité post-modernisation ( $\eta_{post}$ ). Il est nécessaire de définir la relation pour effectuer le passage d'une base de données d'index à une autre. Cette relation triviale est donnée par l'équation suivante :

$$E_{\% \text{ final}} = 1 - \frac{\eta_{\text{pré}}}{\eta_{\text{post}}} (1 - E_{\% \text{ VSD}})$$

Ainsi l'économie d'énergie  $E_{kWh}$  s'écrit :

$$E_{kWh} = E_{\% \text{ final}} C_{\text{pré}}$$

Avec  $C_{\text{pré}}$  la consommation pré-modernisation de la pompe à vitesse constante.

De plus d'autres informations peuvent être utilisées pour corriger ces indicateurs si on envisage un remplacement complet du système de pompage. Le rendement nominal total de l'ancienne pompe et de la nouvelle (électrique et hydraulique) doit alors être utilisé dans l'équation précédente.

L'approche méthodologique d'évaluation utilisée pour l'amélioration de la gestion du débit d'eau glacée est schématiquement synthétisée à la Figure 6-16. La première étape de cette méthodologie consiste à créer une base de donnée de bâtiments et système, de sélectionner une méthode d'évaluation, d'évaluation l'impact des facteurs de diversité et de distinction afin de définir le domaine de variation de l'indicateur de performance. Au cours de ce processus, nous avons sélectionné des données requises pour évaluer cet indicateur.

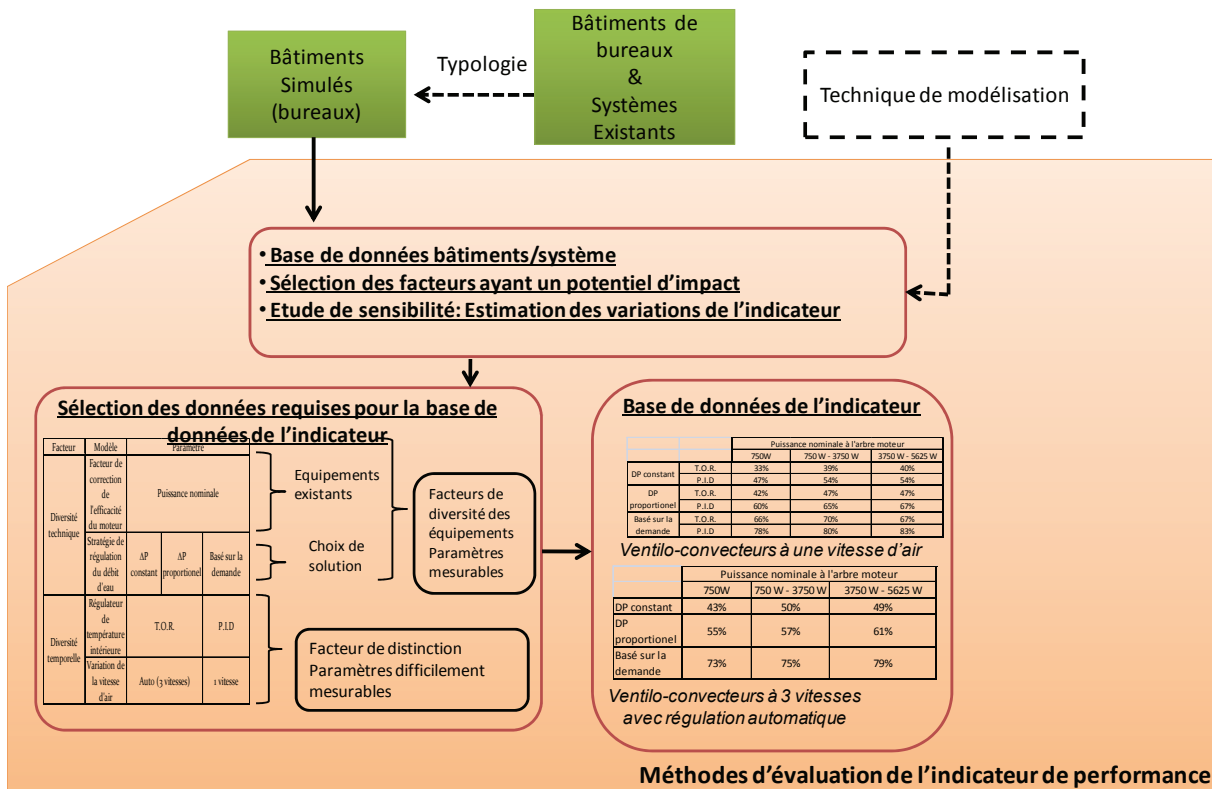


Figure 6-16 Synthèse de la méthodologie d'évaluation de l'indicateur de performance

Toutefois nous rappelons que la période d'évaluation utilisée dans le calcul de l'indicateur correspond aux moments où la charge thermique est non nulle.

Nous montrons à l'annexe 3, que **les économies d'énergie peuvent s'écrire approximativement**, et ce avec un biais inférieur à 15%, à l'aide de l'équation suivante:

$$E_{\text{tot}} \approx E_{\% \text{ final}} P_{\text{elec}} t_{\text{tot}} = C_{\text{ref}} E_{\% \text{ final}}$$

Finalement, nous avons développé une méthode d'évaluation simple basée sur des ratios. Elle requiert l'évaluation des variables suivantes :

- La puissance électrique du moteur en fonctionnement à plein régime
- Le rendement électrique du moteur
- Le temps annuel de fonctionnement de la pompe
- Le type de ventilo-convecteur (1 vitesse d'air, trois vitesses d'air)
- La dynamique du régulateur de température
- Si nécessaire, le rendement du nouveau bloc pompe et moteur à pleine charge

Toutes ces variables peuvent être évaluées pendant la période pré ou post modernisation. Cependant, toutes ces variables sont à priori constantes<sup>25</sup> pendant ces deux périodes de temps.

Notons toutefois qu'il est envisageable de rechercher une relation plus complexe pour définir la valeur de l'indicateur  $E_{\%VSD}$ . En effet, lors de notre démarche de simplification, nous avons calculé celui-ci en utilisant l'équation suivante :

$$E_{\%} = \sum_{i=1}^{20} \left( 1 - \frac{t_i}{t} \frac{P_{elec i}}{P_{elec nom}} \right) = \sum_{i=1}^{20} \left( 1 - \frac{t_i}{t} \frac{\eta_{tot}}{\eta_{tot i}} \right)$$

Avec  $P_{elec i}$  la puissance électrique du moteur pour le bin  $i$ ,  $P_{elec nom}$  la puissance nominale électrique du moteur, le ratio  $\frac{t_i}{t}$  est défini pour un ventilateur soit à une vitesse soit à trois vitesses d'air.

Cette relation requiert l'évaluation des variables suivantes :

- Le débit d'eau maximal
- La puissance électrique nominale et la puissance électrique appelée pour chaque bin de puissance thermique (par rapport à la puissance maximale thermique demandée)<sup>26</sup>
- Le temps de fonctionnement pour chaque bin de puissance thermique (par rapport à la puissance maximale thermique demandée)

Notons que les deux premières variables peuvent être évaluées facilement soit par des mesures directes soit indirectes. Par contre, la troisième variable est plus difficilement mesurable.

Notons également que le temps de fonctionnement pour chaque bin de puissance peut être fortement variable entre deux périodes d'évaluations données.

Les deux méthodes que nous venons de proposer requièrent une évaluation de la puissance électrique nominale et du temps de fonctionnement totale. Par conséquent nous proposons dans le paragraphe suivant de développer une méthode d'évaluation pour ces deux variables.

<sup>25</sup> Si la conception du système ne change pas, ou si la durée de fonctionnement est invariante pendant la période d'évaluation (pré-modernisation ou post-modernisation).

<sup>26</sup> Cette évaluation requiert de pouvoir évaluer les propriétés thermiques des échangeurs et des propriétés techniques de la pompe et de son moteur.



## 6.7 Méthodes d'évaluation de la consommation pré-modernisation

Pour les deux options d'améliorations que nous avons étudiées, il est nécessaire d'évaluer le temps de fonctionnement total de la pompe et sa puissance au débit nominale de l'installation, c'est-à-dire la consommation du système de pompage pendant la période pré-modernisation.

Cependant, la plupart des auxiliaires ne sont pas équipés de l'instrumentation nécessaire pour délivrer ce type d'information.

Nous proposons de mettre au point une **méthode d'évaluation permettant de calculer** la consommation d'une pompe à débit fixe. Cette évaluation peut alors nous permettre d'estimer les économies d'énergie pour la mise en place d'une exploitation à débit variable et pour une exploitation centrale optimisée :

$$\begin{cases} E_{\% \text{ final}} = 1 - \frac{\eta_{\text{pré}}}{\eta_{\text{post}}} (1 - E_{\%}) \\ E_{kWh} = E_{\% \text{ final}} C_{\text{pré}} \end{cases}$$

Pour évaluer la consommation de la pompe à débit constant, il est nécessaire d'évaluer la puissance de la pompe et son temps de fonctionnement initial.

$$P_{\text{elec}} = \frac{P_{th} \Delta P}{C_p \Delta T \eta_{\text{hydrau}} \eta_{\text{elec}}}$$

Puis la consommation pré-modernisation s'exprime en fonction de son temps de fonctionnement :

$$C_{\text{pré}} = P_{\text{elec}} t_{\text{marche}}$$

Bien entendu, conformément au chapitre 4, paragraphe 4.1.6, il faut garder en mémoire qu'une méthode calculée peut être corrigée ou calibrée. Nous revenons sur ce point au paragraphe 6.8.3 pour **développer des procédures d'évaluation**.

Dans cette partie nous nous attachons au développement d'une méthode pouvant faire appel à des données in-situ mais également pouvant permettre d'évaluer la consommation à défaut de ces données. Nous recherchons donc à appliquer la démarche méthodologique utilisé pour élaborer un benchmark numérique.

### 6.7.1 Evaluation du différentiel de pression d'un réseau

Nous recherchons donc dans ce paragraphe à évaluer les pertes de charge du réseau hydraulique.

L'évaluation des pertes de charge du réseau peut bien sur être effectuée par une **mesure** en utilisant les manomètres installés sur l'installation au niveau des pompes mais si ces équipements sont absents nous devons proposer d'autres méthodes d'évaluation.

Le différentiel de pression d'un réseau d'eau, que nous supposons constitué sans bouteille de découplage, est le suivant :

$$\Delta P = \Delta P_{\text{tuyaux}} + \Delta P_{\text{evap}} + \Delta P_{\text{emetteur}}$$

Le différentiel de pression d'un réseau d'eau découplé hydrauliquement séparé s'écrit pour le réseau primaire:

$$\Delta P_{\text{primaire}} = \rho g j L_{\text{maxi primaire}} + \Delta P_{\text{evap}}$$

$$\Delta P_{\text{secondaire}} = \rho g j L_{\text{maxi secondaire}} + \Delta P_{\text{emetteur}}$$

Par exemple, les **documents relatifs à la conception** peuvent procurer, à l'inspecteur ou l'auditeur, une **estimation** sur la perte de charge de certains composants ou de tout le réseau. De la même manière, le **dossier des ouvrages exécutés** (ou un **registre de**



**maintenance)** peut inclure une **mesure** de la perte de charge au moment de l'installation (ou effectuée pendant l'exploitation).

Mais en l'absence d'une partie ou de la totalité ces informations il est nécessaire de rechercher une méthode permettant d'estimer la perte de charge par un calcul. Ce calcul peut être calibré en utilisant les informations disponibles.

### 6.7.2 Evaluation du différentiel de pression de l'évaporateur d'une machine frigorifique

Le différentiel de pression côté eau de l'évaporateur est disponible dans la documentation du constructeur du groupe frigorifique mais également peut être obtenue sur le site Eurovent [Eurovent] si le produit est certifié.

Notons cependant que plus de 75% des GPEG vendus sont des unités inférieures à 150 kW frigorifique (Figure 6-17). Pour les unités de capacité frigorifique supérieure, des manomètres sont le plus souvent installés, une mesure devrait alors être possible.

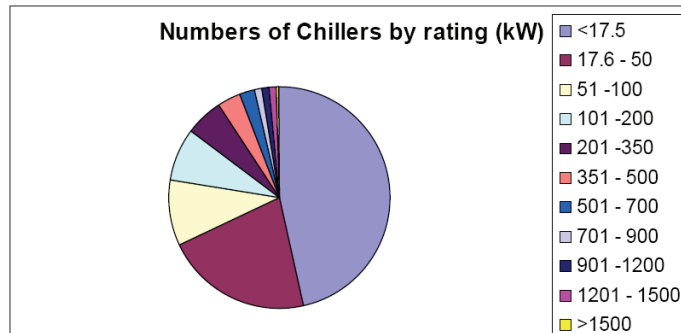


Figure 6-17 Répartition des ventes de GPEG par capacité frigorifique [EuPHVAC10]

A défaut, pour estimer le différentiel de pression côté eau d'un évaporateur, nous avons réalisé une étude statistique<sup>27</sup> (Figure 6-18) pour des produits certifiés par Eurovent [Eurovent]. Une dispersion importante de la perte de charge existe après 150 kW frigorifique. Nous proposons donc de retenir les valeurs médianes pour trois catégories de puissance (Tableau 6-28). Notons que la valeur de la médiane pour la première catégorie est proche de la valeur de 30 kPa proposée dans [EN15243].

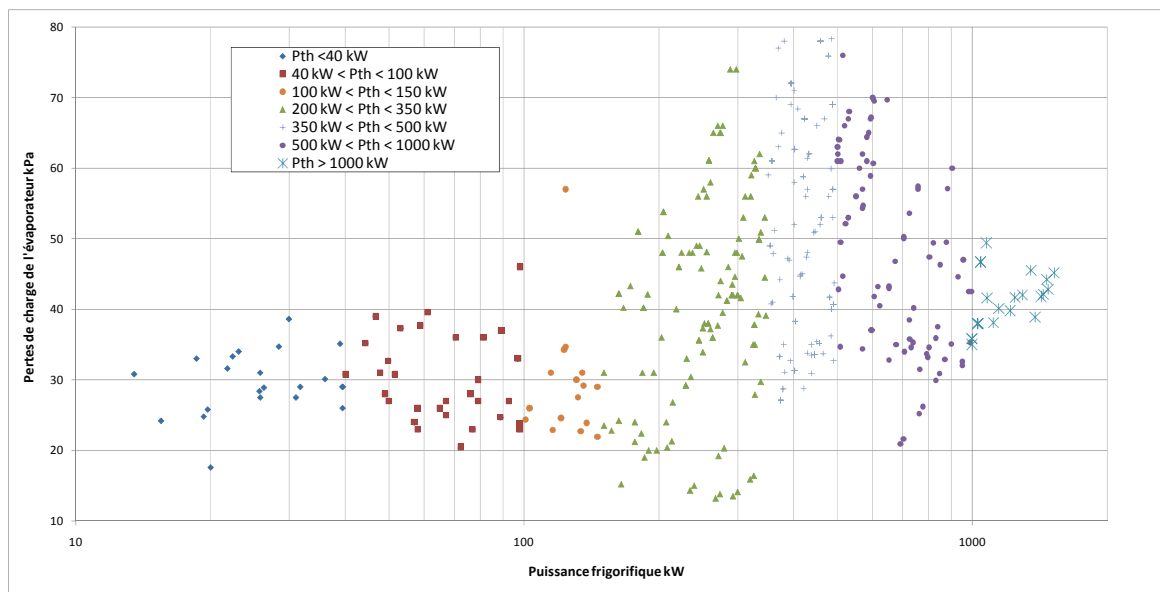


Figure 6-18 Pertes de charge de l'évaporateur pour des GPEG certifiés par [Eurovent]

<sup>27</sup> 476 modèles de trois fabricants

	15 kW < P <sub>th</sub> < 150 kW	150 kW < P <sub>th</sub> < 1000 kW	P <sub>th</sub> > 1000 kW
Médiane kPa	29	46	42

Tableau 6-28 Valeurs de la perte de charge de l'évaporateur

### 6.7.3 Evaluation du différentiel de pression d'une unité terminale

Le différentiel de pression d'un échangeur, utilisé en CTA ou dans une unité terminale, est disponible dans la documentation du constructeur mais également peut être obtenue sur le site Eurovent [Eurovent] si le produit est certifié.

A défaut, pour estimer le différentiel de pression d'une unité terminale de type ventilo-convecteur, nous avons réalisé une étude statistique<sup>28</sup> pour des produits certifiés par Eurovent [Eurovent].

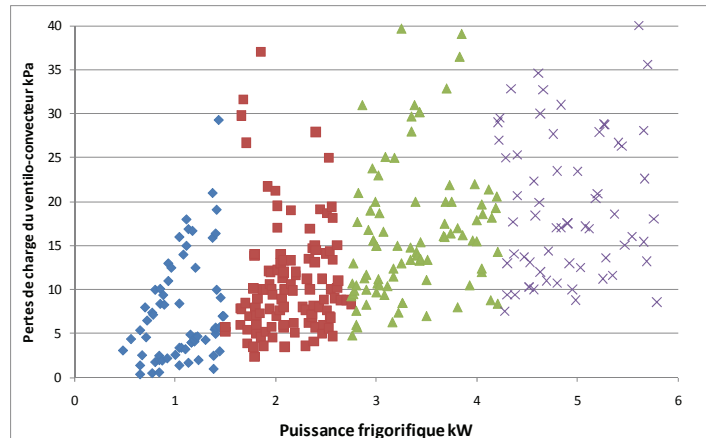


Figure 6-19 Pertes de charge de ventilo-convecteur certifiés par [Eurovent]

Nous proposons de retenir la médiane d'une valeur de 13 kPa. Cette valeur est inférieure à celle proposée dans [RT2005] et celle de [EN15243]<sup>29</sup>.

### 6.7.4 Evaluation du différentiel de pression d'un réseau secondaire

La perte de charge des tuyaux peut être calculée comme suit :

$$\Delta P_{\text{tuyaux}} = \rho g j L_{\text{maxi}}$$

En l'absence de données mesurées ou des valeurs de conception de l'installation, la longueur maximale du réseau peut être estimée [EN15243] :

$$L_{\text{maxi secondaire}} = 2 \left( L + \frac{l}{2} + h + 10 \right) (1 + z)$$

Avec z un coefficient de correction pour prendre en compte les pertes de charge singulières du réseau. Une valeur de 0.3 est proposée dans [EN15243]. Nous avons représenté schématiquement à la Figure 6-20 l'emplacement du GPEG en explicitant les différentes distances de cette relation.

<sup>28</sup> 453 modèles de six fabricants, la valeur moyenne est de 15 kPa

<sup>29</sup> Notons que la valeur proposée dans [EN15243] est de 35 kPa, et de 20 kPa dans [RT2005].

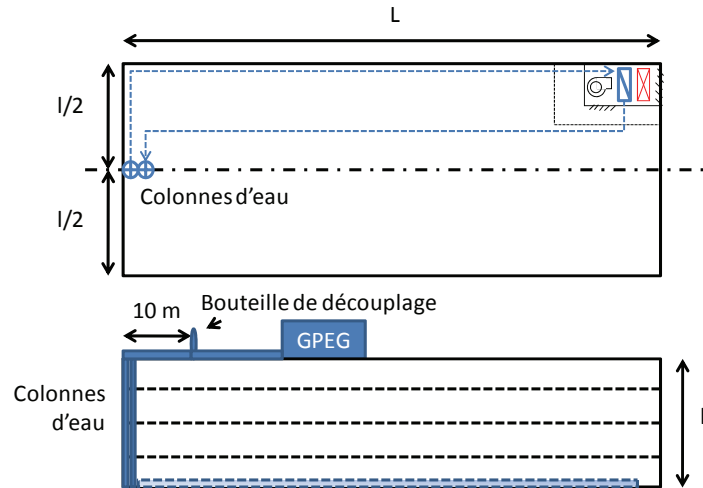


Figure 6-20 Plan schématique du réseau selon [EN15243]

Bien entendu le positionnement du GPEG d'une installation peut aboutir à une autre relation entre les différents mètres du bâtiment. Par exemple si le GPEG est positionné au milieu de la toiture nous proposons la relation suivante :

$$L_{\text{maxi secondaire}} = 2 \left( \frac{L}{2} + \frac{l}{2} + h \right) (1 + z)$$

Nous rappelons que la perte de charge linéique ( $j$ ) est typiquement comprise entre  $10 \text{ mm}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}$  et  $20 \text{ mm}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}$  (paragraphe 1.9.5.2).

Un calcul de la perte de charge de la tuyauterie peut donc être effectué et ce en fonction du positionnement de la bouteille de découplage et de la géométrie du bâtiment.

#### 6.7.5 Evaluation de la puissance électrique d'une pompe du réseau secondaire pour notre typologie de bâtiment

Nous proposons de déterminer la perte de charge de la tuyauterie pour la typologie de bâtiments que nous avons introduits au paragraphe 6.4.2, en appliquant l'estimation de la longueur maximale du réseau de [EN15243]. Les résultats sont présentés au Tableau 6-29.

	Type 3	Type 2	Type 1c	Type 1b	Type 1a	
Type de bureau	Petit	Large	Petit	Large	Open space	
$L_{\text{maxi secondaire}} \text{ (m)}$	117	201	321	249	224	
$j \text{ (mm}_{\text{H}_2\text{O}} / \text{m})$	17	17	17	17	17	hypothèses
$\Delta P_{\text{tuyaux}} \text{ (kPa)}$	25	44	70	54	48	
$\Delta P_{\text{emetteur}} \text{ (kPa)}$	10	20	10	20	25	hypothèses
$\Delta P_{\text{secondaire}} \text{ (kPa)}$	35	64	80	74	73	

Tableau 6-29 Perte de charge du réseau secondaire

Avec les hypothèses que nous avons retenues, notons que les pertes de charge du réseau secondaire sont proches de celle proposées au Tableau 6-6.

Les simulations effectuées dans le cadre de l'étude d'un débit variable nous permettent de calculer la charge thermique sensible maximale à évacuer par le système d'émission. Nous avons synthétisé ces informations dans le tableau suivant.

	Charge thermique sensible (kW)	Charge totale estimée (kW) (***)	Charge totale estimée / surface climatisée (W/m²)
Type 3 (*)	52,25	63	82
Type 2 (**)	168	202	52
Type 1c (*)	1020	1223	101
Type 1b (**)	729	875	76
Type 1a (**)	901	1081	77

(\*) La charge maximale a été évaluée en utilisant une moyenne pour 4 climats (Paris, Lisbonne, Turin, Stockholm)

(\*\*) La charge maximale a été évaluée en utilisant le climat de Paris

(\*\*\*) Un coefficient de 1,2 a été appliqué pour tenir compte de la charge latente et l'élévation de température due aux pertes hydrauliques

Tableau 6-30 Calcul de la charge thermique maximale

A l'aide des deux tableaux précédents, il est alors possible d'estimer la puissance hydraulique nécessaire de la pompe. Puis, en supposant un rendement hydraulique et un rendement électrique, d'estimer la puissance électrique du moteur. Nous avons considéré que la pompe est équipée d'un moteur standard et une pompe d'efficacité moyenne (voir respectivement Figure 5-11 et chapitre 5, paragraphe 5.6.3).

	P <sub>hydrau</sub> W	P <sub>shaft</sub> W	Rendement (électrique et hydraulique)	P <sub>elec</sub> kW
Type 3	106	<b>181</b>	32%	<b>0,3</b>
Type 2	613	<b>1048</b>	38%	<b>1,6</b>
Type 1c (*)	4658	<b>3981</b>	43%	<b>10,7</b>
Type 1b (*)	3096	<b>2646</b>	42%	<b>7,4</b>
Type 1a (*)	3802	<b>3250</b>	43%	<b>8,9</b>
(*) Compte tenu de la puissance hydraulique nécessaire, nous avons considéré deux pompes en parallèles				

Tableau 6-31 Puissance électrique du moteur pour la typologie de [IEA48]

Notons que les hypothèses que nous avons effectuées au paragraphe 6.6.7 correspondent bien aux différentes valeurs de puissances de ce tableau.

#### 6.7.6 Estimation du temps total de fonctionnement d'une pompe

Dans le but d'évaluer le temps de fonctionnement d'une pompe à débit fixe, il est possible d'évaluer son temps de fonctionnement en prenant en compte sa programmation, par exemple :

- Un fonctionnement annuel ( $t_{tot} = 8760$  heures / an)
- Une programmation hebdomadaire permettant de l'arrêter le week-end ( $t_{tot} = 6456$  heures / an)
- Une programmation hebdomadaire et journalière ( $t_{tot} = 3324$  heures / an)

## 6.8 Procédure d'identification d'économie d'énergie pour l'exploitation du débit variable

Dans la partie 6.2, nous avons proposé une procédure d'identification.

Dans cette partie nous développons les procédures associées à :

- L'évaluation de la consommation pendant la période pré-modernisation
- L'évaluation de l'indicateur de performance

Ces deux évaluations nous permettent d'évaluer l'économie d'énergie d'une exploitation à débit variable du réseau.

### 6.8.1 Mise au point d'une procédure en deux étapes

Dans le paragraphe 6.6.9 et le paragraphe 6.7, nous avons proposé respectivement des méthodologies d'évaluation de l'indicateur de performance et de la consommation pré-modernisation. L'emploi de ces deux méthodes requiert un certain nombre de paramètres potentiellement disponibles sur site ou qui peuvent être supposé par défaut. Si les données disponibles sont réduites, cette évaluation peut s'effectuer pendant une analyse préliminaire et ensuite une analyse complémentaire à l'aide de la récupération de données techniques et expérimentales. Mais cette évaluation peut directement s'effectuer pendant une phase d'analyse lorsque toutes les données nécessaires sont disponibles. Cette procédure correspond à celle proposé au chapitre 4 dont nous reprenons le schéma à la Figure 6-21.

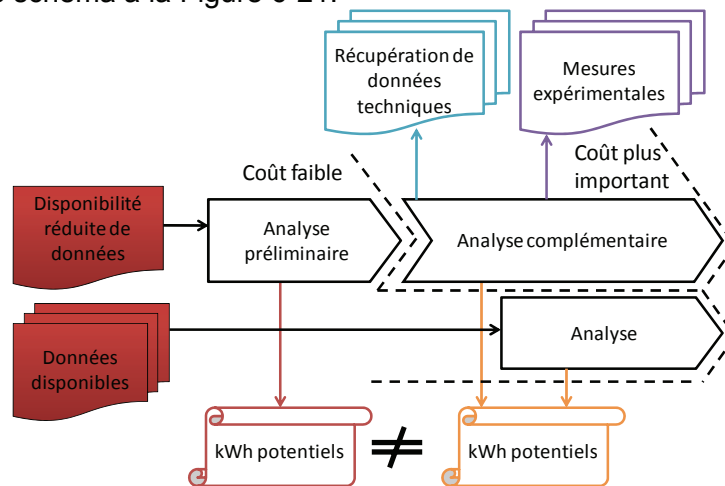


Figure 6-21 L'analyse des informations

Pour la phase d'analyse préliminaire, un outil d'évaluation basé sur des ratios est le plus simple à utiliser compte tenu que l'instrumentation nécessaire pour suivre l'évolution du besoin thermique peut se révéler relativement coûteuse.

Pour l'analyse complémentaire, cet outil d'évaluation peut être corrigé ou calibré pour prendre en compte les données liées à la performance du moteur, à la consommation pré-modernisation,..., ou par un suivi du besoin thermique de l'installation.

### 6.8.2 Coût de la procédure de mesure et vérification

Afin de déterminer les moyens techniques utilisables lors de la mise en œuvre d'une procédure d'identification d'économie d'énergie, nous proposons d'examiner ce coût comme celui d'une procédure de mesure et vérification (M&V) dans le cadre d'un service énergétique. Ainsi, le **coût maximal du protocole** peut être estimé à l'aide des hypothèses suivantes :

- Le cout du protocole M&V représente au maximum 10% des économies d'énergie réalisées [IPMVP07] (voir chapitre 4, paragraphe 4.2.3)

- En estimant de façon conservatrice les économies d'énergie entre 33% et 66% quel que soit le cas d'application
- Un ratio de puissance électrique installée 750 W / 1000 m<sup>2</sup> pour le système de pompage
- Une période de six mois de fonctionnement
- Un tarif d'électricité de 0.1 € / kWh

Ces limites de coût sont représentées dans la Figure 6-22 et reprise dans le Tableau 6-32 pour plusieurs surfaces climatisées.

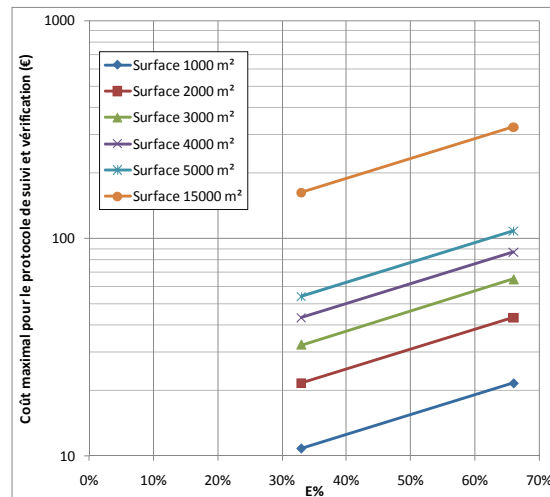


Figure 6-22 Limites de coût du plan M&V pour notre action

EE%	Surface m <sup>2</sup> / Type					
	1000 / Type 3	2000	3000	4000	5000 / Type 2	15000 / Type 1
33%	11	22	33	43	54	163
66%	22	43	65	87	108	325

Tableau 6-32 Limites de coût du plan M&V pour notre action

L'estimation du coût de protocole de mesure et vérification (M&V) est très faible pour le bâtiment de Type 3 [11€ ; 22€] et le Type 2 [54€ ; 108€]. En supposant le taux horaire de 1000€/jour pour un expert [Dupont06], le protocole M&V devrait être au mieux constitué d'une mesure d'intensité permettant d'évaluer la puissance appelée par la pompe. Par contre dans le cas d'un bâtiment de Type 1, les moyens mis en œuvre peuvent être plus importants.

Un outil d'évaluation par traitement de données pourrait être élaboré en deux temps pour déterminer le profil de la charge thermique et le calcul des économies d'énergie, en reprenant les différentes étapes de calculs explicitées pour effectuer le post-traitement du besoin thermique normalisé par la puissance frigorifique installée au niveau des ventilo-convecteurs.

Nous n'avons pas de données supplémentaires afin de chiffrer plus exactement ces prestations. Toutefois compte tenu de l'estimation des coûts pour la procédure M&V, les procédures requérant une évaluation du besoin thermique ne semblent pas pouvoir être appliquées pour l'étude de bâtiments inférieurs à 5000 m<sup>2</sup>, pour lequel la procédure M&V doit être inférieure à 108€.

### 6.8.3 Développement de procédures d'identification

Nous proposons différentes procédures en distinguant trois étapes qui sont ; une recherche visuelle d'information, une évaluation de la consommation pré-modernisation, l'estimation de l'économie d'énergie.

Nous avons classé ces procédures par ordre croissant de coût, précision et disponibilité des informations pour créer deux procédures. Ces deux procédures correspondent à l'analyse préliminaire et à l'analyse complémentaire. Nous avons également distingué deux options pour la procédure d'analyse complémentaire : la première procédure permet d'évaluer l'indicateur par une méthode d'évaluation basée sur des ratios ; la seconde permet d'évaluer l'indicateur par une méthode d'évaluation statique.

### **Procédure d'analyse préliminaire**

- i **Recherche de données visuelles ou documentaires**
  - Présence d'un système de pompage à débit fixe pour le réseau secondaire
  - Présence d'une régulation automatique du débit d'air au niveau du contrôle locale de température
  - Puissance à l'arbre du moteur (indiquée sur la plaque du constructeur)
- ii **Evaluation de la consommation pré-modernisation**
  - Soit à l'aide du relevé d'un sous compteur
  - Soit par une évaluation de la puissance (à l'aide d'hypothèses sur le rendement hydraulique et électrique de la pompe) et d'une évaluation du temps de fonctionnement (voir paragraphe 6.7)
- iii **Estimation de l'indicateur  $E_{\%VSD}$  et de l'économie d'énergie**
  - A partir de la base de données de l'indicateur  $E_{\%VSD}$

### **Procédure d'analyse complémentaire (Option 1)**

- i **Evaluation de la consommation pré-modernisation**
  - Soit par une mesure directe (wattmètre/ampèremètre)
  - Soit par une mesure indirecte (manomètre et de la courbe caractéristique de la pompe) de la puissance et une évaluation du temps de fonctionnement

De la même manière il est possible de proposer une procédure demandant plus de mesures expérimentales :

### **Procédure d'analyse complémentaire (Option 2)**

- i **Recherche documentaire**
  - Rendement du moteur à charge partielle
  - Puissance frigorifique installée
  - Perte de charge et débit du réseau
- ii **Evaluation de la consommation pré-modernisation**
  - Soit par une mesure directe (wattmètre / ampèremètre)
  - Soit par une mesure indirecte (manomètre et de la courbe caractéristique de la pompe) de la puissance et une évaluation du temps de fonctionnement
- iii **Estimation de l'indicateur  $E_{\%VSD}$  et de l'économie d'énergie**
  - Mesure du besoin thermique de l'installation et évaluation des temps de fonctionnement à débit partiel
  - Post-traitement des mesures avec la méthode simplifiée définie au paragraphe 5.2.3.

Nous avons synthétisé notre démarche méthodologique pour l'option 1 à la figure suivante.

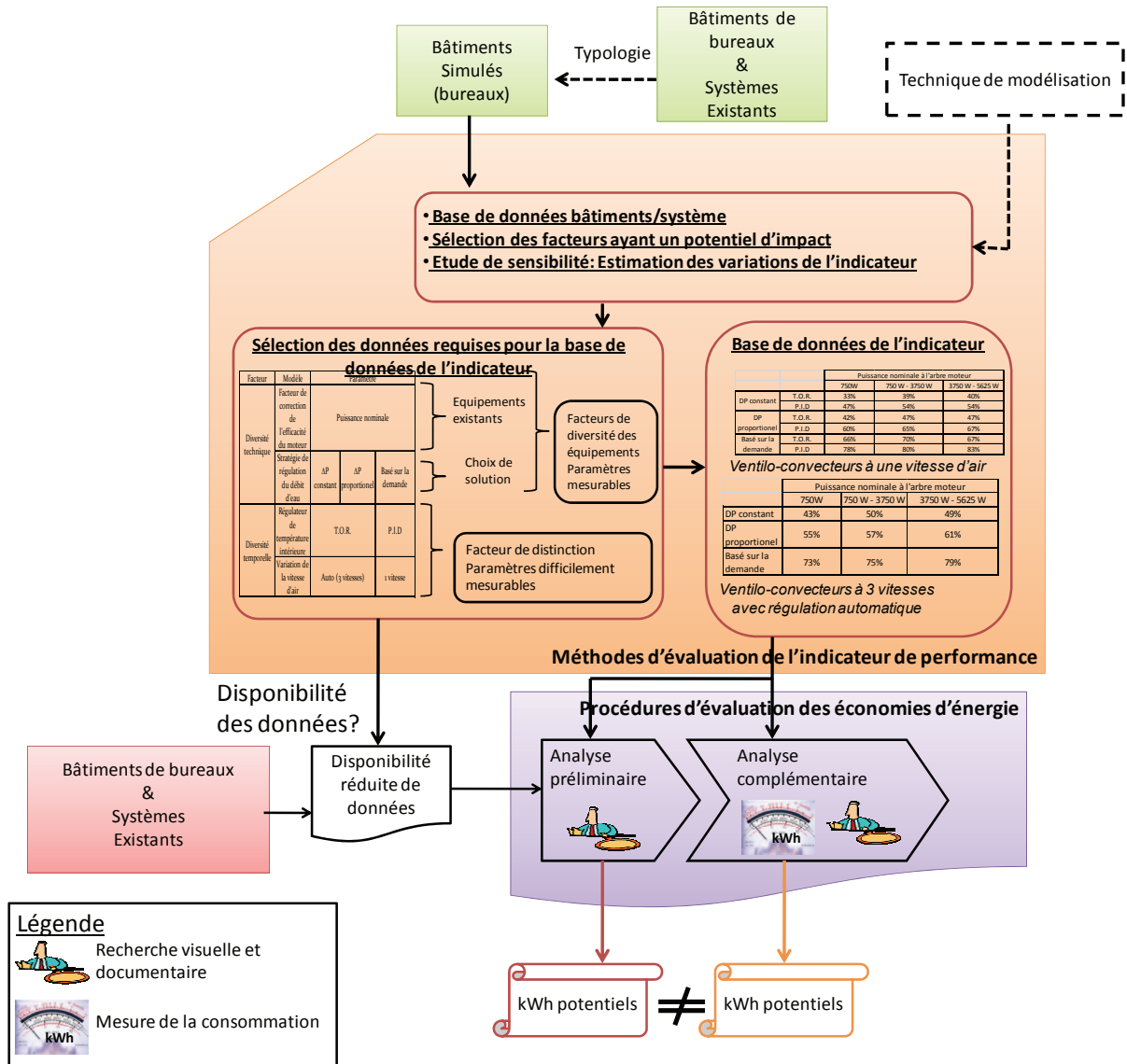


Figure 6-23 Synthèse de la méthodologie pour l'identification de l'économie d'énergie de la V.V.



## 6.9 Procédures d'identification d'économie d'énergie pour l'exploitation centrale

Nous avons démontré qu'un indicateur de performance peut être utilisé pour optimiser le mode été/hiver. La connaissance de la puissance de la pompe est l'unique donnée nécessaire pour déterminer l'économie d'énergie. Un protocole expérimental permet de réduire l'incertitude liée à l'estimation de cette puissance.

Nous proposons ci-dessous deux procédures pour estimer les économies d'énergie de la programmation du fonctionnement annuel des pompes.

### **Procédure d'analyse préliminaire**

- i **Recherche visuelle**
  - La puissance à l'arbre, le facteur de puissance, l'intensité et la tension (pour évaluer la puissance électrique, voir annexe 5)
- ii **Evaluation de la consommation pré-modernisation**
  - Soit à l'aide du relevé d'un sous compteur
  - Soit par une évaluation de la puissance (à l'aide d'hypothèses sur le rendement hydraulique et électrique de la pompe) et d'une évaluation du temps de fonctionnement (voir paragraphe 6.7)
- iii **Estimations de l'indicateur  $E_{\%}$  et de l'économie d'énergie**
  - A partir de la valeur de  $E_{\%}$  égale à 33%

### **Procédure d'analyse complémentaire**

- i **Evaluation de la consommation pré-modernisation**
  - Par une mesure directe (wattmètre/ampèremètre) ou indirecte (manomètre et de la courbe caractéristique de la pompe) de la puissance et une évaluation du temps de fonctionnement

Les procédures proposées ci-dessus permettent alors d'identifier les économies d'énergie relative à une optimisation de l'exploitation saisonnière du réseau d'eau glacée.

Toutefois, notre base de données est limitée. Des études supplémentaires pourraient être effectuées pour prendre en compte d'autres paramètres. Ces études complèteraient la procédure d'analyse complémentaire en proposant d'autres valeurs de l'indicateur  $E_{\%}$  (voir paragraphe 6.5.7).

## Chapitre 7 Application de stratégies d'exploitation pour économiser l'énergie et maîtriser le confort de l'occupant

Dans cette partie, nous recherchons à appliquer les différentes méthodologies du chapitre 3 et 4 pour développer de nouvelles stratégies d'exploitation.

L'analyse du potentiel de ces nouvelles stratégies, nous conduit à développer une méthode d'évaluation dynamique avec laquelle nous pourrions évaluer chacune de ces stratégies pour des bâtiments et des systèmes représentatifs.

Dans un premier temps nous proposons d'analyser des critères opérationnels permettant de quantifier le confort (paragraphe 7.1.2).

La première de ces stratégies consiste à améliorer le confort des occupants pour un système deux tubes. La seconde stratégie s'appuie sur la théorie du confort adaptatif pour autoriser une dérive de la température intérieure pendant la journée. L'impact sur le confort de ces deux stratégies doit être examiné en détail pour proposer des solutions opérationnelles aux praticiens.

Nous cherchons à analyser ces deux stratégies qualitativement et d'expliquer pourquoi ces stratégies peuvent être développées (paragraphe 7.1.5 et paragraphe 7.1.6).

Nous formalisons alors des propositions de stratégies (paragraphe 7.2.1 et paragraphe 7.3.1).

Pour tester la robustesse et la performance de nos stratégies, nous nous basons sur la méthodologie de benchmark. Nous proposons d'utiliser les premières étapes de la méthodologie du chapitre 3, paragraphe 3.4.2, à savoir :

- Mettre au point une base de données constituant les caractéristiques de la population, cette base de données sera utilisée pour définir les particularités des bâtiments étudiées. Cette base de données est constituée de façon à mettre en évidence la sélection des facteurs ayant un impact potentiellement sensible sur le ou les indicateurs de performance (ce point n'est pas exposé dans ce chapitre, voir chapitre 6, paragraphe 6.4)
- Effectuer des études de sensibilité de ces facteurs sur le ou les indicateurs de performance (paragraphe 7.2.3 et 7.2.5 ; paragraphe 7.3.3).

## 7.1 Interaction entre le confort et l'exploitation d'un système de climatisation

### 7.1.1 Notion de confort

L'équilibre physiologique de l'homme en ambiance artificielle est le phénomène principal pour assurer la santé et le confort des occupants d'un bâtiment. Le corps humain a la propriété de maintenir sa température à peu près constante quel que soit les conditions extérieures, l'activité physique qu'il exerce, ou son code vestimentaire. Le corps humain tend vers un équilibre thermique entre sa production interne de chaleur et l'échange de chaleur avec le milieu externe. Un flux de chaleur est ainsi échangé entre le corps et l'ambiance extérieure par les principaux phénomènes physique suivants :

- Par convection et conduction entre la surface du corps et l'air
- Par rayonnement de la surface du corps vers toutes les parois qui l'entourent
- Par évaporation d'eau à la surface de la peau
- Par respiration

La notion de confort prend en compte ces différents paramètres afin de définir les limites dans lesquelles l'usager d'un bâtiment est dans une situation dite « confortable ».

### 7.1.2 Critères de confort opérationnels

L'enjeu principal du contrôle de la climatisation et du chauffage est le respect du confort des occupants, ainsi la modification du contrôle des équipements ne doit pas altérer la qualité de l'ambiance intérieure.

Pour caractériser le confort dans un bâtiment nous proposons d'utiliser l'outil de simulation dynamique SimAudit [SimAudit], présenté au paragraphe 5.3. Deux critères opérationnels<sup>30</sup> de confort peuvent être choisis pour définir le confort des occupants :

- Critère 1 : La limite de confort est obtenue à partir de la loi d'ouverture des vannes, la température limite est celle définie par la bande proportionnelle utilisée (voir chapitre 5, paragraphe 5.4.4.1) qui résulte de la température du thermostat (proche de l'air). Cette limite est appliquée comme un critère de température constante. Cette température limite permet alors de déterminer si le confort est respecté.
- Critère 2 : La limite de température peut être définie comme une température opérative comme pour la norme de confort [EN15251]. Cette température limite permet alors de déterminer si le confort est respecté.

### 7.1.3 Indicateurs de confort retenus

Compte tenu des deux critères que nous avons sélectionnés, il existe trois indicateurs permettant d'évaluer quantitativement le confort :

- Le nombre d'heures d'inconfort (nombre d'heures pour lequel le confort n'est pas respecté)
- Les degrés-heures d'inconfort (valeur absolue de la somme des différences de la température intérieure et de la température limite de confort lorsque le confort n'est pas respecté)
- L'inconfort moyen (ratio degrés-heures d'inconfort / nombre d'heures d'inconfort)

---

<sup>30</sup> Comme nous l'avons précisé au chapitre 1, paragraphe 1.11, il existe d'autres critères mais ils ne sont pas opérationnels.

### 7.1.4 Analyse des indicateurs en fonction des critères de confort

Des simulations effectuées<sup>31</sup> pour la période hiver indiquent une différence de température importante entre la température des murs et de l'air. Cette différence est de l'ordre de trois degrés le lundi en milieu de journée. Bien que la température intérieure d'air soit proche de la consigne celle-ci ne permet pas d'assurer le confort minimal requis dans le cas d'une limite de température intérieure mesurée sur la température opérative. En effet, la structure du bâtiment lors des périodes d'inoccupation du week-end va se refroidir (en hiver) ou se réchauffer (en été) provoquant ainsi un inconfort en début de semaine (Figure 7-1).

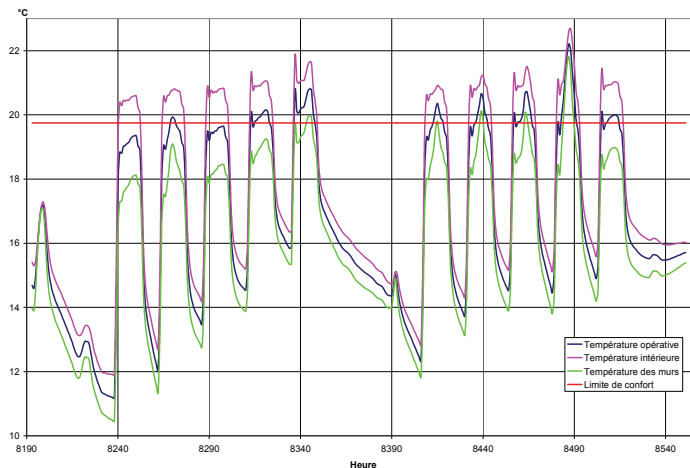


Figure 7-1 Evolution temporelle de la température intérieure et des murs en hiver

En été, cette différence est cependant limitée (de l'ordre de 0.5°C), le confort est atteint.

Pour synthétiser les heures pendant lesquelles le confort n'est pas atteint, nous avons tracé la température de l'air et la température opérative d'une zone du bâtiment en fonction de la température extérieure en moyenne glissante (Figure 7-2). Sur cette même figure nous avons tracé les limites de confort pour une température de 26.5°C en été (ligne rouge) et 19.5°C en hiver (ligne bleue)<sup>32</sup>.

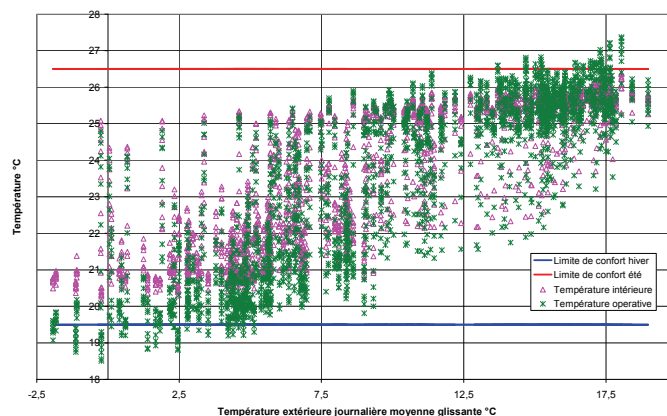


Figure 7-2 Inconfort selon un critère de température opérative constante

Si la limite de confort utilisée est celle d'une température opérative (croix vertes), durant l'année il y a 137 heures d'inconfort en hiver (en dessous de la ligne bleue) correspondant à 48 degrés-heures, l'inconfort moyen est donc de 0.3°C, ce qui est acceptable.

<sup>31</sup> Toutes les simulations dans la partie 7.1 sont effectuées pour un bâtiment de Type 3.

<sup>32</sup> Ces deux températures sont situées entre les conditions requises pour un bâtiment de catégorie II et celles d'un bâtiment de catégorie III de la norme [EN15251] (cf. chapitre 1, paragraphe 1.11).

L'inconfort généré peut s'expliquer par la consigne de température mesurée sur l'air intérieur alors que le critère de confort de la norme [EN15251] est basé sur la température opérative. L'utilisation d'un système de régulation par thermostat ne permet donc pas d'assurer les conditions de confort exigées par la norme.

Cependant, si la limite de confort est celle d'une température d'air (triangles violets), le confort est assuré toute l'année.

Nous avons effectué la même simulation mais en contrôlant théoriquement<sup>33</sup> le système de chauffage par la température opérative et non pas par la température d'air [Caillet09]. Le besoin annuel de chauffage est augmenté d'environ 20%. L'application dans la pratique de la norme [EN15251] aurait pour conséquence d'augmenter les consommations de chauffage des bâtiments pour satisfaire le confort.

### 7.1.5 Inconfort intrinsèque d'un système à deux tubes

L'analyse du besoin en fonction de la température extérieure met en évidence un besoin de chaud et de froid pour une même température extérieure. Cependant, les conditions d'ensoleillement et d'état du bâtiment sont variables (Figure 7-3).

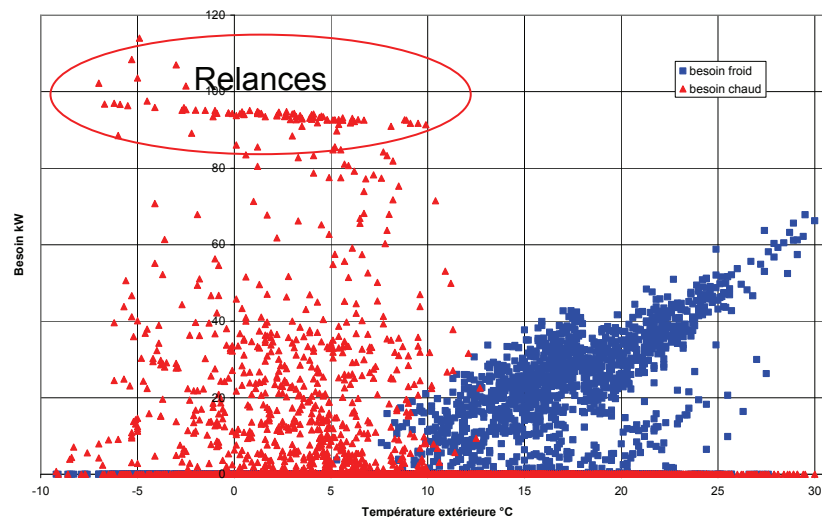


Figure 7-3 Besoin thermique horaire en fonction de la température extérieure

Par conséquent, le contrôle d'un système deux tubes peut induire l'inconfort des occupants si la commutation n'est pas définie adéquatement (voir chapitre 1, paragraphe 1.8.2).

### 7.1.6 Définition du confort adaptatif pour améliorer l'exploitation du système d'émission

La notion de confort adaptatif provient du fait que les occupants d'un bâtiment climatisé développent des exigences quant à la qualité homogène et invariable de la température. Au contraire les occupants de bâtiment (naturellement ventilé et disposant d'ouvrants) peuvent contrôler leur environnement et s'habituent à la variabilité du climat. Ainsi, leur comportement permet de s'adapter à une plus vaste gamme de températures intérieures et de vitesses d'air.

Par conséquent, nous proposons d'exploiter le matin cette propriété pour laisser dériver la consigne de température intérieure en fonction de la température extérieure tout comme le ferait un système de régulation classique pendant son fonctionnement. Avec un interrupteur de contact<sup>34</sup> sur les fenêtres, cette régulation se ferait pièce par pièce.

<sup>33</sup> Notons également que la température mesurée par la sonde de température ambiante est une valeur comprise entre la température opérative et la température de l'air.

<sup>34</sup> Interrupteur de type feuillure

Pour illustrer la dérive potentielle de la température intérieure nous proposons d'examiner la charge horaire thermique en chauffage et en climatisation en fonction de la température intérieure. La simulation d'un bâtiment et de son système de climatisation permet de visualiser pour les différentes consignes<sup>35</sup> de température intérieure la plage de variation des écarts de la température d'intérieure à ces consignes (Figure 7-4). Ces écarts sont les conséquences de la dynamique du système de régulation à bandes proportionnelles.

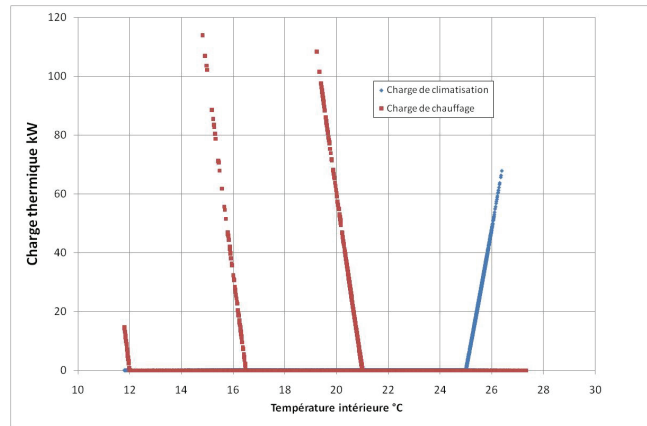


Figure 7-4 Charge thermique en fonction de la température intérieure

Les parts de la charge thermique liées aux charges internes et externes sont présentées dans la figure suivante. Cette approche permet de mettre en évidence la dépendance de la charge en froid avec les conditions d'ambiance extérieure.

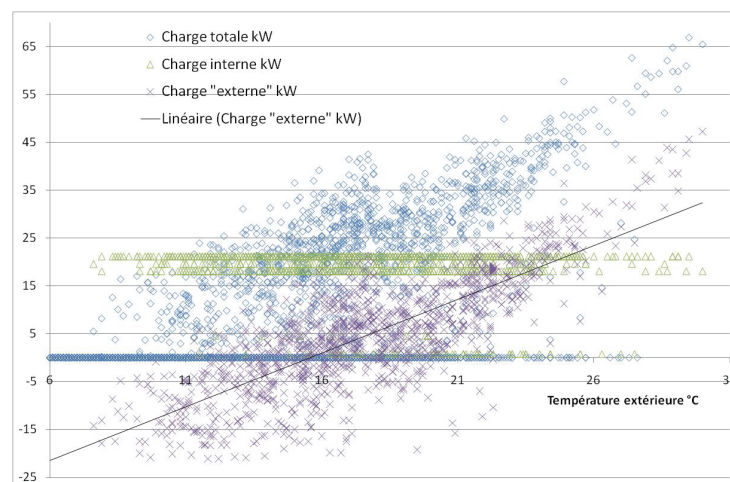


Figure 7-5 Ségrégation de la charge thermique horaire d'un bâtiment de Type 3

Sur cette figure, il apparaît que les apports externes (solaires, conduction de l'enveloppe, ventilation), représentés par des croix violettes, peuvent être du même ordre de grandeur que les gains internes pour une fourchette de température extérieure comprise entre environ 16°C et 23°C. Cet intervalle correspond à un intervalle de température situé en dessous de la température de consigne fixe. En ouvrant les fenêtres pendant cet intervalle de températures et en arrêtant le système de climatisation, il semble alors exister un potentiel de dérive de la température intérieure.

Il est alors envisageable de prendre en compte la notion de confort adaptatif afin de développer des solutions d'optimisation énergétique. Toutefois pour développer un tel

<sup>35</sup> Cinq consignes de température intérieure sont fixés : trois pour le chauffage (période d'occupation à 21°C / hors occupation à 12°C / relance à 16.5°C) et deux pour la climatisation (période d'occupation à 25°C / hors occupation à 35°C). Notons que pendant la simulation, la température limite hors occupation en climatisation n'est jamais atteinte.

contrôle hybride nous pensons indispensable que ce soit **l'occupant lui-même qui interagisse avec son environnement**.

## 7.2 Evaluation de l'amélioration du confort pour le contrôle d'un système deux tubes

La mise au point d'une stratégie d'exploitation pour un système deux tubes requiert une analyse du confort intérieur. En effet, la période de chauffage et celle de rafraîchissement concordent durant certaines périodes de l'année. Pour les bâtiments de faibles tailles, l'opération de commutation s'effectue manuellement deux fois par ans. Le plus souvent une date unique est alors nécessaire afin de sélectionner le mode de fonctionnement adéquat.

Nous proposons d'optimiser cette date, les méthodes existantes n'étant pas opérationnelles.

### 7.2.1 Proposition d'une stratégie de contrôle optimisée pour un système deux tubes

Nous proposons de tester la stratégie suivante : le GPEG est mis en marche lorsque la température extérieure en moyenne glissante est supérieure à 12°C et est arrêté lorsque celle-ci descend en dessous de 8°C dans un intervalle de temps de +/- 15 jours par rapport à la date précisée dans le contrat.

### 7.2.2 Présélection des facteurs de sensibilité pour un système deux tubes

Nous proposons d'étudier les indicateurs de confort en utilisant la même base de données que celle développée précédemment. Les différents paramètres sont sélectionnés afin de rendre le bâtiment simulé représentatif d'une catégorie de bâtiment représentant 25% du parc de bâtiments français : le bâtiment de Type 3 (voir chapitre 6, paragraphe 6.4.2). C'est un bâtiment de faible surface (1000 m<sup>2</sup>) et pour lequel l'équipe d'exploitation n'est présente que ponctuellement. Nous venons ainsi de présélectionner des facteurs de sensibilité.

Pour notre cadre d'application orienté vers l'étude du confort, nous avons sélectionné l'outil SimAudit qui intègre les équipements et leurs contrôles respectifs.

Pour l'étude de cette stratégie nous proposons de retenir un critère de confort basé sur la température d'air.

Nous testons dans un premier temps la pratique couramment employée par les services d'exploitation pour les bâtiments de petites tailles. Nous proposons ensuite une stratégie permettant d'optimiser cette pratique.

### 7.2.3 Analyse des performances pour un système deux tubes existant

Généralement l'exploitant de l'installation, pour les bâtiments de petit tertiaire, se rend sur site afin de changer le mode de fonctionnement (mode été / hiver). Une date est normalement stipulée dans le contrat d'exploitation. Ainsi, le thermostat mode hiver (21°C) est fixé pour les semaines 42 à 20 et il est fixé en mode été (25°C) pour le reste de l'année<sup>36</sup>. Cette stratégie simulée correspond à la pratique de l'exploitant du bâtiment.

---

<sup>36</sup> La loi de contrôle calendrier est déterminée de la manière suivante : la saison de chauffage commence le 287<sup>ième</sup> jour de l'année (semaine 42) et se termine le 131<sup>ième</sup> jour.



Type de stratégie	Date prédéfinie
Degrés heures été	318
Degrés heures hiver	0
Nombre heures d'inconfort été	162
Nombre heures d'inconfort hiver	0
Inconfort moyen °C été	2,0
Inconfort moyen °C hiver	-

Tableau 7-1 Inconfort pour le cas de référence et un système 2 tubes

Un inconfort d'été important est obtenu pour cette stratégie de contrôle. Il est donc essentiel pour la société d'exploitation de le réduire pour satisfaire son client.

#### 7.2.4 Evaluation des indicateurs de confort pour la stratégie optimisée

Le tableau suivant résume l'analyse du confort obtenu par simulation du bâtiment type pour une année de référence pour une définition calendaire et pour la stratégie optimisée.

	Date prédéfinie	Stratégie améliorée
Nombre d'heures d'inconfort hiver	0	2
Nombre d'heures d'inconfort été	171	62
Degrés-heures d'inconfort hiver	0	0,42
Degrés-heures d'inconfort été	340	124
Inconfort moyen hiver °C	-	0,21
Inconfort moyen été °C	2	2

Tableau 7-2 Comparaison d'une stratégie classique et d'une stratégie optimisée

L'inconfort résultant est approximativement divisé par un facteur deux. L'inconfort généré pour la période hivernal est très limité (deux heures d'inconfort).

Cette méthode est donc envisageable pour une année typique, il convient d'examiner la validité de cette stratégie de contrôle pour des années météorologiques réelles.

#### 7.2.5 Analyse des facteurs de différenciation

Nous analysons dans ce paragraphe l'impact de la sensibilité de certains **facteurs de différenciation** sur nos indicateurs de confort. Pour réaliser cette étude nous examinons l'impact de fichiers météorologiques réels pour le climat de Paris pour les années 2000, 2001, 2002, 2003.

année	2000		2001		2002		2003	
Type de stratégie	Date prédéfinie	Optimisée	Date prédéfinie	Optimisée	Date prédéfinie	Optimisée	Date prédéfinie	Optimisée
Degrés heures d'inconfort été	46	0	43	0	14	14	84	41
Degrés heures d'inconfort hiver	0	1,87	0,87	15,44	0	1,01	1	0,82
Nombre heures d'inconfort été	34	0	69	0	22	20	106	55
Nombre heures d'inconfort hiver	0	2	2	16	0	2	1	1
Inconfort moyen °C été	1,36	-	0,62	-	0,65	0,71	0,79	0,75
Inconfort moyen °C hiver	-	0,94	0,43	0,97	-	0,50	0,82	0,82

Tableau 7-3 Impact des facteurs de différenciation sur les indicateurs de confort

Pour les années 2000 et 2003, la méthode proposé réduit voir élimine tout problème d'inconfort. Pour les années 2001 et 2002, la stratégie n'induit pas de changement notable sur les conditions de confort des occupants.



La stratégie proposée permet donc de réduire l'inconfort.

## 7.3 Evaluation des économies d'énergie pour une exploitation hybride de la température

### 7.3.1 Proposition de contrôle hybride

La notion de confort adaptatif permet de limiter la consommation en prenant en compte une consigne de température intérieure variable en fonction de la température extérieure.

Ainsi, l'adaptation des occupants par rapport à l'ambiance thermique intérieure est utilisée afin de permettre une certaine déviation de la température et ainsi réduire les besoins de froid.

Nous proposons de **développer un contrôle de la température d'air pour laquelle la climatisation est coupée la nuit et sa remise en route s'effectue manuellement par l'occupant lorsque sa perception du confort thermique n'est pas satisfaisante** (voir Annexe 2, fiche ECO P1.4).

Pour estimer le gain potentiel associé à cette stratégie, nous proposons d'utiliser comme limite de la dérive de la température la limite de confort de la norme [EN15251] dans le cas d'un bâtiment non climatisé. Nous pouvons ainsi estimer le moment où l'ambiance intérieure n'est pas confortable lorsque la climatisation est arrêtée. Lorsque cette limite est dépassée, la climatisation est mise en marche, la température de consigne est alors une valeur qui est inférieure à la limite de confort d'un bâtiment climatisé (stratégie 1). Notons que pour chaque jour, cette limite est calculée en fonction de la température extérieure en moyenne glissante journalière.

Une deuxième stratégie a été simulée afin de la comparer à la précédente. Cette stratégie utilise une consigne constante de température égale à 26.5°C (stratégie 2).

La figure suivante représente schématiquement l'évolution temporelle au cours d'une journée de la température intérieure pour les deux stratégies précédentes.

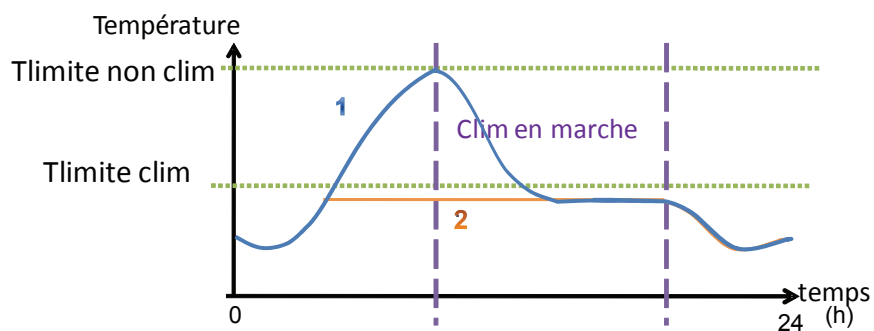


Figure 7-6 Schéma représentatif du contrôle hybride proposé

### 7.3.2 Présélection des facteurs de sensibilité pour le contrôle hybride

Il est nécessaire de définir précisément dans quelle configuration ce contrôle hybride peut s'appliquer. Nous proposons donc de restreindre le domaine d'application de ce type de contrôle.

Les bâtiments de faibles tailles contiennent pour la plupart des bureaux de **faibles tailles**. Ces bureaux ont **un accès facilité aux fenêtres**, et doivent en particulier **contenir peu de personnes**, ce qui exclut les bureaux de type « open-space ». De plus, les fenêtres doivent être équipées de **contact de type feuillure** pour éviter tout gaspillage énergétique. Notons également, que le **code vestimentaire de l'entreprise** doit être assez **souple** pour s'adapter aux conditions d'ambiance extérieure.

Lorsque ces différentes conditions sont réunies, il nous semble envisageable d'utiliser notre contrôle hybride de la climatisation.

C'est pourquoi dans le cadre de notre étude, nous avons effectué une analyse de l'impact de notre stratégie de contrôle hybride sur un bâtiment de Type 3 (voir chapitre 6, paragraphe 6.4.2).

### 7.3.3 Performance consommation / confort du contrôle hybride

Nous avons réalisé l'étude de ces stratégies pour une année de référence<sup>37</sup>. Nous avons utilisé des critères de confort basés sur des limites de température opérative de la catégorie de bâtiment III de [EN15251], et ce, pour chacune des deux stratégies de contrôle :

- Pour le contrôle hybride : la limite en température opérative est celle d'un bâtiment climatisé de catégorie III lorsque le système de climatisation est en marche, et la limite en température opérative est celle d'un bâtiment non-climatisé lorsque le système de climatisation est arrêté.
- Pour le contrôle à consigne constante : la limite en température opérative est celle d'un bâtiment climatisé de catégorie III.

Pour notre environnement virtuel, nous n'avons pas pris en compte de ventilation naturelle, mais il est possible de supposer que les unités de climatisation continuent d'apporter un flux d'air sur les occupants.

Les résultats en termes de températures opératives de ces deux stratégies sont donnés à la Figure 7-7. Cette figure extrait deux semaines du mois de Juillet en fonction de la température journalière extérieure en moyenne glissante. **Les ronds sont utilisés pour la stratégie hybride, les carrés sont utilisés pour la stratégie de consigne constante.** La ligne en pointillés représente la limite de confort lorsque la climatisation n'est pas en fonctionnement. La ligne horizontale en gras représente la limite de confort pour un bâtiment climatisé.

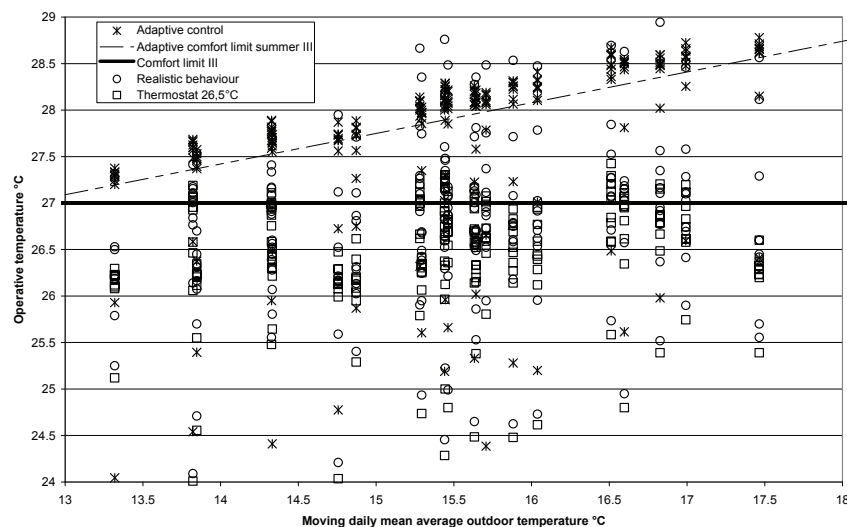


Figure 7-7 Températures opératives pour les deux stratégies [Caillet09]

Pendant trois à quatre heures par jour, la température intérieure dérive jusqu'à la température limite d'un bâtiment non-climatisé. Comme nous l'avons constaté, au paragraphe 7.1.2, il existe un inconfort malgré une consigne de température constante car la température contrôlée n'est pas la température opérative. Nous avons synthétisé la performance annuelle en termes de consommation thermique et de confort pour les deux stratégies de contrôle au tableau suivant.

<sup>37</sup> Compte tenu de la structure du code de calcul, nous avons été contraints d'introduire un coefficient de surdimensionnement du GPEG pour assurer la convergence de l'outil.

	Contrôle hybride	Consigne constante
Nombre d'heure d'inconfort	278	229
Degrés heures d'inconfort été	77	57,1
Inconfort moyen °C	0,3	0,2
Besoin froid kWh/m <sup>2</sup>	23,6	25,5

*Figure 7-8 Résultat de la performance consommation/confort de la stratégie hybride*

Le gain de besoin annuel thermique pour le système de climatisation est d'environ 7%. Globalement le confort est respecté.

Comme un surdimensionnement a été appliqué pour effectuer les simulations, les conditions d'ambiance peuvent être plus dégradées que celle évaluées dans notre simulation. En effet, si la climatisation n'arrive pas à faire respecter la consigne imposée, le confort du bâtiment climatisé n'est alors pas respecté pendant une durée plus longue.

D'un autre côté, notons que le changement de consigne survient une heure après la détection de l'inconfort, ce qui dégrade de surcroît le confort. Mais le besoin thermique est quand à lui surestimé.

Une étude paramétrique serait nécessaire afin d'analyser la sensibilité de caractéristiques supplémentaires (géométriques, thermiques).

## 7.4 Synthèse des propositions

En analysant le confort d'un bâtiment a priori confortable toute l'année (système quatre tubes) avec une température de consigne à 25°C, ce qui est en dessous de la limite autorisée en France [POPE07], l'utilisation stricte de la norme [EN15251] montre que le bâtiment n'est pas confortable.

Cet inconfort est dû à la dynamique du système de régulation mais surtout à l'inertie du bâtiment. En effet, la norme existante s'appuie sur la mesure de la température opérative, qui n'est pas mesurée et contrôlée par le système de régulation.

Nous avons proposé une stratégie de régulation pour le passage biannuel été-hiver des systèmes de climatisation et de chauffage à deux tubes. En l'utilisant chaque année, cette stratégie peut permettre à une société d'exploitation de mieux cibler les dates pour lesquelles l'inversion du système doit s'effectuer et ainsi apporter un service supplémentaire au propriétaire ou au manager d'un bâtiment.

Nous avons également proposé une stratégie de contrôle hybride avec laquelle il est possible de tenir compte d'une dérive de température intérieure. Nous avons effectué une analyse de la performance de notre stratégie. Cette étude préliminaire montre que notre stratégie a un certain potentiel énergétique (7% de réduction du besoin thermique de froid) tout en maîtrisant le confort des occupants.

Toutefois les résultats de l'étude de ce contrôle hybride sont à nuancer. D'une part, des études numériques supplémentaires permettraient de rendre compte de l'impact possible d'une surconsommation électrique de l'installation (temps supplémentaire à pleine charge). Et d'autre part, cette stratégie hybride devrait être étudiée expérimentalement pour définir des critères de confort particuliers. En effet, il n'existe pour l'instant aucun critère opérationnel pour définir les conditions de température d'un bâtiment fixées parfois comme celles des conditions de rafraîchissement naturel et fixées parfois comme celles des conditions d'ambiance climatisées.

## Chapitre 8 Proposition de benchmarks paramétrés pour une inspection réglementaire

Dans le but de réduire les émissions de CO<sub>2</sub>, l'Europe a mis en place des dispositifs réglementaires visant la réduction des consommations des bâtiments. L'inspection des installations doit y concourir mais nous allons voir que le chemin est long entre les observations et les conclusions sur l'efficacité énergétique.

L'article 9 de la directive de performance énergétique du bâtiment (DPEB) de 2002 [DPEB02] impose aux Etats membres de l'Union Européenne « de prendre les mesures nécessaires pour assurer une **inspection régulière** des parties accessibles d'un système de climatisation d'une puissance effective supérieure à 12kW. Cette inspection doit inclure une **évaluation de l'efficacité de l'installation et de son dimensionnement**. **Les utilisateurs doivent être conseillés** sur le remplacement ou sur des modifications à apporter au système de climatisation ».

Ces conseils, qui sont maintenant optionnels [DPEBrecast10], étaient obligatoire pour l'article 9 de [DPEB02] sur la base duquel nous avons travaillé.

La transposition française de la directive [DPEB02], par un décret [Jodecret10] et deux arrêtés [Joarrete1] [Joarrete2], remplit les conditions requises au sens de [DPEB02]. En effet, l'inspection réglementaire française inclus d'une part l'inspection régulière des parties accessibles, une évaluation de l'efficacité et du dimensionnement, et d'autre part la fourniture de conseils sur le remplacement ou sur des modifications à apporter au système de climatisation.

Tout d'abord, nous analysons en détail, au paragraphe 8.1, l'inspection réglementaire existante qui est essentiellement basée sur [EN15240]. Nous proposons ainsi de poursuivre l'analyse de l'approche normative [EN15240] que nous avons effectuée au chapitre 3, paragraphe 3.3.

Nous envisageons ensuite une approche permettant d'évaluer quantitativement la performance du système de climatisation et les économies d'énergie. Cette approche est sélectionnée, au paragraphe 8.2, et ce conformément aux conclusions que nous avons synthétisées au chapitre 4, paragraphe 4.3.

Pour créer cette nouvelle approche quantitative, nous proposons au fil des paragraphes 8.3 à 8.5 de décomposer l'efficacité d'un système (SSEER) en examinant chacun des postes ayant un impact sur celle-ci.

Au paragraphe 8.3, nous proposons une méthode d'évaluation de l'efficacité du groupe de production d'eau glacée (SEER). Cette méthode permet de prendre en compte les **spécificités de maintenance** du groupe de production d'eau glacée.

Au paragraphe 8.4, nous proposons une méthode d'évaluation de la consommation de chacun des postes du système. Cette méthode permet de prendre en compte les **spécificités de conception** de chacun de ces postes.

Au paragraphe 8.5, nous proposons une méthode permettant de prendre en compte globalement les **spécificités d'exploitation** du système et d'un bâtiment existant.

La procédure d'inspection doit tenir compte simultanément de ces spécificités pour l'évaluation de la performance ou des économies d'énergie. Par conséquent, nous

proposons au paragraphe 8.6, une **méthode d'évaluation générique adaptée aux spécificités** d'un système existant.

Cependant, nous devons également tenir compte du faible niveau de coût en termes humain et technique de cette inspection. Nous proposons alors d'utiliser la liste d'opportunités du chapitre 2, et ce, en sélectionnant certaines d'entre elles pour élaborer une procédure efficace.

## 8.1 Critique de l'approche réglementaire existante de la procédure d'inspection

Nous rappelons que pour l'approche normative, une inspection d'un système de climatisation est élaborée au sens de la norme [EN15240] :

- par l'examen de la documentation pertinente relative à la conception du système,
- par des vérifications visuelles des équipements,
- par des vérifications des réglages du système et des paramètres de régulation,
- par des méthodes de mesures optionnelles,
- par la fourniture de recommandations<sup>38</sup>.

### 8.1.1 Examen de la documentation

L'examen de la documentation doit pouvoir montrer [EN15240] :

- « la conformité du système par rapport à la conception d'origine et à ses modifications ultérieures, aux besoins réels et à l'état actuel du bâtiment ;
- le fonctionnement correct du système ;
- la fonction et la consigne des différents paramètres de régulation ;
- la fonction et l'ajustement des divers composants ;
- la puissance absorbée et la puissance utile résultante. »

Nous rappelons que cette documentation est composée des documents relatifs à la conception, aux caractéristiques du système et à son exploitation. Par exemple, ces informations peuvent être disponibles dans le dossier des ouvrages exécutés (D.O.E.), le registre de maintenance, des rapports de commissionnement.

Dans [EN15240], dans le cas où la documentation concernant la conception et les caractéristiques du système est obsolète ou absente, une documentation minimale doit être constituée par l'inspecteur, ce qui allonge de façon significative la durée de l'inspection et donc le coût de l'inspection. De plus aucune méthode n'est disponible pour interpréter précisément cette documentation.

Concernant le dimensionnement, la norme propose de comparer les besoins de rafraîchissement à la puissance frigorifique installée. Mais aucune méthode n'est proposée pour réaliser cette étape.

Cependant, notons que dans la transposition française de [DPEB02], une méthode basée sur un ratio permet de juger du dimensionnement [JOarrete2].

### 8.1.2 Vérifications visuelles des équipements

Les vérifications visuelles sont formulées sous la forme d'une liste de points de contrôle, dont nous en proposons un exemple simple dans le Tableau 8-1.

---

<sup>38</sup> Ce qui est maintenant obsolète pour la première approche de [DPEBrecast10]



Points de contrôle de l'inspection	
Etat général de la maintenance	Satisfaisant / Insatisfaisant
Rapport de maintenance	Oui / Non
Propreté des filtres à air	Satisfaisant / Insatisfaisant
Isolation thermique (visuellement)	Satisfaisant / Insatisfaisant
Propreté des échangeurs	Satisfaisant / Insatisfaisant
Températures du réfrigérant	Satisfaisant / Insatisfaisant
Pressions du réfrigérant	Satisfaisant / Insatisfaisant
Fuite du réfrigérant	Oui / Non
Calibrage des capteurs	Oui / Non
Arrêt automatique de l'unité quand les fenêtres sont ouvertes	Oui / Non

Tableau 8-1 Exemple de points de contrôle d'une machine frigorifique

L'inspecteur doit répondre de façon binaire à ces points de contrôle.

Nous avons mis en application sur un ensemble de bâtiments cette inspection [HarmonacFT10]. Étant donné que la documentation pertinente de l'installation est souvent absente, nous avons ensuite utilisé la liste de points de contrôle proposée dans la transposition française de la directive [JOarrete2].

Sans aucune méthode de mesure, et en l'absence d'une gestion technique du bâtiment, si les paramètres de fonctionnement de l'installation sont corrects (pression, température), la seule conclusion du rapport d'inspection sera une constatation du type « encrassement des filtres », variable d'un inspecteur à l'autre, comme nous l'illustrons à la Figure 8-1. Le caractère approximatif de la remarque n'aide pas le maître d'ouvrage. L'inspecteur, quant à lui, peut être tenté de rechercher uniquement les défauts du service de maintenance, ce qui limite par conséquent la qualité des conclusions obtenues. On ne parle donc pas d'énergie pour une inspection purement visuelle.



Figure 8-1 Filtre encrassé

Il n'y a donc pas de méthode pour évaluer quantitativement l'efficacité du système de climatisation. Il convient donc de créer un lien entre l'efficacité et la procédure de maintenance.

### 8.1.3 Vérifications des réglages du système et des paramètres de régulation

Le but de la vérification des réglages et des paramètres de régulation du système de climatisation est d'identifier des améliorations et des défauts en relation avec l'exploitation du système. L'approche proposée permet de déterminer qualitativement l'efficacité du système de contrôle en notant la présence ou l'absence de fonctions. Mais cette vérification ne permet pas de quantifier le possible impact en terme énergétique.

### 8.1.4 Mesures optionnelles

Des mesures ponctuelles, périodiques, ou continues peuvent être utilisées pour estimer l'efficacité des équipements, pour vérifier le système de régulation, ou bien encore le dimensionnement des installations. Cependant si aucune mesure n'est disponible, l'évaluation de ces différents points n'est pas possible.

Notons que sans aucune méthode de mesurage, une gestion technique de bâtiment (GTB) peut permettre de vérifier certains points de contrôle et plus particulièrement ceux concernant l'exploitation de certains postes.

#### 8.1.5 Conseils portant sur l'amélioration de l'efficacité du système

Conformément à l'article 9 de [DPEB02], des recommandations devaient être également être données aux utilisateurs sur « l'éventuelle amélioration ou le remplacement du système de conditionnement d'air et sur les autres solutions envisageables ». Mais les « recommandations sont données à titre indicatif et ont une valeur informative » [JOarrete2].

Ceci est en phase avec l'article 15 de [DPEBrecast10], qui impose uniquement ces conseils pour une approche alternative.

#### 8.1.6 L'inspection réglementaire, une inspection qualitative ?

Cette proposition normative permet de répondre **qualitativement** à certains enjeux réglementaires comme la **vérification des parties accessibles** des équipements de conditionnement d'air.

Cependant les résultats que l'on peut escompter par l'utilisation de cette norme sont faibles pour des systèmes peu documentés et peu mesurés. De plus, les conseils portent le plus souvent sur la qualité du travail de l'équipe de maintenance.

La partie visuelle de la procédure réglementaire d'inspection des climatiseurs [JOarrete2] se base essentiellement sur cette approche normative. Dès lors, il est envisageable qu'une telle inspection n'ait pas l'impact initialement escompté pour favoriser les investissements en faveur de l'efficacité énergétique.

Nous proposons dans le paragraphe suivant d'examiner le contenu qu'il serait possible de donner à une inspection réglementaire améliorée en examinant le coût de la procédure associée.

## 8.2 Vers une évaluation quantitative de l'efficacité et des conclusions de qualité

Nous proposons d'élaborer une procédure permettant d'améliorer la transposition de [DPEB02] combinant :

- Une procédure permettant d'évaluer quantitativement l'efficacité du système de climatisation
- Une procédure permettant de conseiller le propriétaire ou le manager en évaluant quantitativement des économies d'énergie

### 8.2.1 Définition d'un cadre procédural pour l'inspection réglementaire

Comme nous l'avons préconisé au chapitre 4, paragraphe 4.3 nous proposons de découper le travail de l'inspecteur en deux étapes : une analyse préliminaire, une analyse complémentaire. Nous rappelons que l'analyse préliminaire doit permettre de sélectionner des solutions d'amélioration à partir d'une première évaluation des économies d'énergie. L'analyse complémentaire doit permettre de quantifier avec plus de précision les économies d'énergie associées.

Lorsque les données disponibles sont suffisamment abondantes, alors les étapes de d'analyse préliminaire et complémentaire sont confondues. Ces étapes correspondent à celles proposées au chapitre 4, paragraphe 4.3. Nous rappelons celles-ci schématiquement sur la Figure 8-2.

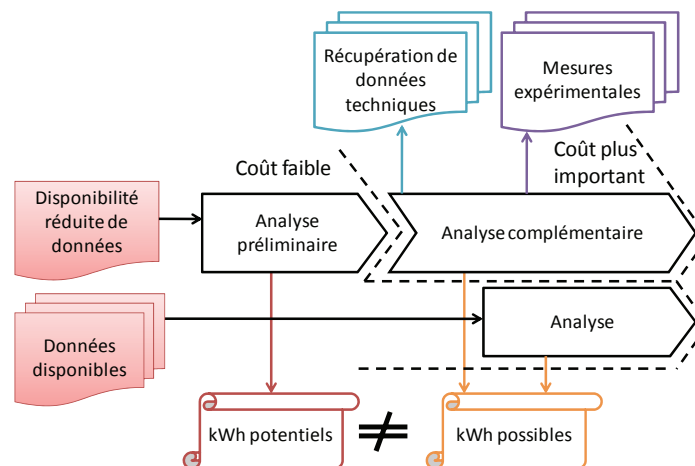


Figure 8-2 Cadre procédural de pré-inspection et d'inspection

### 8.2.2 Le coût de la procédure d'inspection réglementaire

Comme nous l'avons remarqué au chapitre 4, paragraphe 4.2.3, pour les techniques d'évaluation de [IPMVP07] il existe un seuil maximal de coût. Ce seuil de coût correspond à un certain pourcentage de l'économie d'énergie que la procédure ne doit pas dépasser. Pour notre cadre de procédure d'inspection, il nous semble que le coût de mise en œuvre pour contrôler la performance de l'installation doit correspondre à un certain coût maximum, qui sera proche de celui recommandé dans [IPMVP07]. Ce coût de procédure peut bien sûr être ajusté pour prendre en compte des spécificités nationales comme la politique énergétique d'un pays. Ces différentes procédures peuvent être formulées en analysant le coût et la précision escomptée de l'évaluation (voir paragraphe 4.3.3).

De plus, chacun des Etats Membres peut décider d'arrêter « La » procédure d'inspection à l'analyse préliminaire. Il peut donc exister des différences entre les procédures des pays Membres de l'Union Européenne.

En France, c'est le propriétaire qui a la charge de faire effectuer et de payer en totalité cette dite inspection. Pour impacter le comportement des propriétaires ou des

exploitants, il faut par conséquent que la procédure d'inspection permettent de formuler des conclusions de qualité à moindre coût, et ce en particulier pour les propriétaires réticents à payer un service qui leur semble inutile.

L'analyse préliminaire est l'approche qui est d'ores et déjà appliquée depuis la publication de la réglementation française [JOdecret] [JOarrete1] [JOarrete2], et ce, pour la transposition de [DPEB02].

Mais n'oublions pas que le mécanisme d'inspection a pour but d'attirer l'attention sur la possibilité d'amélioration de l'efficacité du système et donc d'inciter à l'investissement afin de réduire la consommation. Il faut donc que la procédure permette de produire des conclusions de qualité suffisante, ce qui n'est pas totalement résolu du fait de la portée limitée des conclusions (voir partie 8.1).

Nous proposons d'élaborer deux procédures d'inspection réglementaire en améliorant le contenu de cette analyse préliminaire.

### 8.2.3 Une base pour évaluer l'efficacité du système de climatisation et les économies d'énergie

Pour améliorer la transposition de [DPEB02], nous proposons de définir respectivement une méthode d'évaluation permettant de quantifier l'efficacité du système de climatisation et une méthode permettant de quantifier des économies d'énergie.

Nous proposons d'utiliser le cadre formel que nous avons développé au chapitre 4 pour hiérarchiser la procédure d'évaluation quantitative de la consommation énergétique d'un bâtiment. Conformément au chapitre 4, paragraphe 4.1.6, nous rappelons que nous avons distingué quatre méthodes d'évaluation :

- Une évaluation mesurée
- Une évaluation calculée
- Une évaluation calculée et corrigée
- Une évaluation calculée et calibrée

Dans le chapitre 4, paragraphe 4.3, nous avons mis en évidence que les seules méthodes d'évaluation applicables pendant l'analyse préliminaire sont les méthodes d'évaluation mesurées, ou calculées ou calculées et corrigées. Compte tenu du coût supposé de [DPEBrecast10], les deux méthodes utilisées pour effectuer chacune des évaluations sont proches.

### 8.2.4 Quelles sont les données indispensables pour l'évaluation des économies d'énergie et de l'efficacité ?

Retenons tout d'abord que le sous comptage est uniquement obligatoire selon l'article 77 de la Réglementation Thermique [RT05] pour « suivre les consommations de refroidissement » pour les bâtiments autres que d'habitation ayant une surface climatisée supérieure à 400 m<sup>2</sup>, notons que cette disposition réglementaire existe depuis 1982 [RT82]. De la même manière selon l'article 76 de [RT05], « si la surface éclairée est supérieure à 1000 m<sup>2</sup>, un ou des dispositifs doivent permettre de suivre les consommations de l'éclairage ».

Pour la France et pour la plupart des bâtiments tertiaires, cette réglementation impose donc une mesure des consommations de la production de froid et du système d'éclairage.

Dans le cadre de notre démarche, il est donc indispensable de prendre avantage de cette disposition légale pour formuler une procédure qui soit cohérente avec [DPEB02].

### 8.2.5 Proposition d'amélioration de la procédure d'évaluation de l'efficacité

Comme nous l'avons indiqué au chapitre 2, l'efficacité du système de climatisation peut être évaluée, au sens physique, par la prise en compte de tous les équipements affectant le ratio entre la puissance frigorifique utile et la somme des puissances électriques ou thermiques utilisées. Une procédure reposant sur ce principe doit donc inclure une évaluation de la consommation de tous les équipements rentrant dans le bilan énergétique du système. Ces éléments sont les suivants :

- Le groupe de production d'eau glacée (GPEG)
- Les éléments techniques constituant le réseau de distribution d'eau (pompe EG)
- Les éléments techniques constituant le système d'émission (VC)
- Les éléments techniques constituant le réseau de distribution d'air (CTA)
- Les tours de refroidissement ou un condenseur à eau ou un condenseur à air (et leurs circuits respectifs)

Nous notons au tableau suivant ces cinq postes à l'aide d'indices.

Indice i	Poste
1	GPEG
2	pompe EG
3	VC
4	CTA
5	Condenseur séparé

Tableau 8-2 Nomenclature des postes

Nous proposons d'évaluer l'efficacité saisonnière globale d'une installation à l'aide de l'équation suivante.

$$SSEER = \frac{C_{thermique}}{\sum_i C_i} = \frac{SEER}{1 + \sum_{i=2}^4 A_i}$$

Avec  $C_{thermique}$  le besoin thermique annuel du bâtiment et les  $C_i$  la consommation du poste i et avec les  $A_i$  les ratios des auxiliaires :

$$A_i = \frac{C_i}{C_1}$$

Notons que le coefficient de performance du groupe de production d'eau glacée (SEER)<sup>39</sup> est :

$$SEER = \frac{C_{thermique}}{C_1}$$

Tous ces équipements constituent le périmètre d'évaluation de notre système de climatisation.

Il est envisageable de considérer deux approches extrêmes pour effectuer nos évaluations de l'efficacité :

- Les mesures permettant d'évaluer la consommation des différents postes et du besoin thermique sont disponibles, dans ce cas un calcul direct permet d'obtenir directement une évaluation mesurée de la performance.

<sup>39</sup> Dans le cas de GPEG « packagé » c'est-à-dire pour des systèmes dont le système de condensation à air est inclus avec le circuit frigorifique, la consommation des ventilateurs est incluse dans la consommation du GPEG.

- Les informations permettant d'évaluer l'efficacité ne sont pas disponibles, dans ce cas une évaluation calculée et corrigée est utilisée.

Dans les deux approches extrêmes précédentes, l'inspecteur doit seulement traiter un ensemble de données, ce qui laisse supposer un coût faible et équivalent pour les deux procédures d'évaluation. Toutefois, plus les données sont disponibles plus le propriétaire a dû investir pour obtenir les informations sur le suivi de l'installation. Il nous semble donc nécessaire d'avantager ce comportement efficient.

Deux possibilités sont alors envisageables pour récompenser ce comportement :

- Fournir des valeurs de consommation par défaut en fonction des technologies utilisées, dans le cas où les propriétaires ne possèdent pas l'information suffisante pour mesurer la performance.
- Augmenter le prix de la prestation de l'inspection en fonction de la disponibilité des informations.

Compte tenu des remarques formulées au paragraphe 8.2.2 sur la politique énergétique française, nous retenons la première possibilité pour formuler notre procédure réglementaire.

#### 8.2.6 Proposition de développement d'une procédure d'évaluation des économies d'énergie

Dans le but de conseiller efficacement les propriétaires en évaluant les économies d'énergie, l'idée d'une consommation par défaut peut induire directement une sous-estimation ou surestimation de ces économies.

Pour éviter la seconde erreur, il est donc indispensable de proposer une méthode qui tende à « sous-estimer » la consommation des postes.

#### 8.2.7 Synthèse des propositions

Nous proposons d'élaborer une unique méthode d'évaluation qui permet de représenter le parc de bâtiments existant et les équipements existants, ajustable en fonction des données techniques disponibles.

Par conséquent, nous allons évaluer l'efficacité saisonnière du groupe de production frigorifique (SEER) puis évaluer la consommation des autres postes de consommation. C'est cette méthode qui nous servira de base pour développer, sur toute la chaîne énergétique, deux procédures en combinant des valeurs par défaut et des valeurs obtenues sur le terrain.

### 8.3 Evaluation de l'efficacité d'un groupe frigorifique

Nous allons tout d'abord commenter la proposition de [EN15243] pour évaluer la performance d'un groupe froid (SEER). Puis nous proposons une méthode d'évaluation simplifiée.

Enfin nous nous intéresserons au régime de maintenance du groupe pour proposer une nouvelle procédure de calcul de la performance d'un groupe frigorifique.

#### 8.3.1 Approche normative existante

Une procédure d'évaluation de l'efficacité dans le cas d'un groupe frigorifique est donnée dans [EN15243] et présentée à la Figure 8-3.

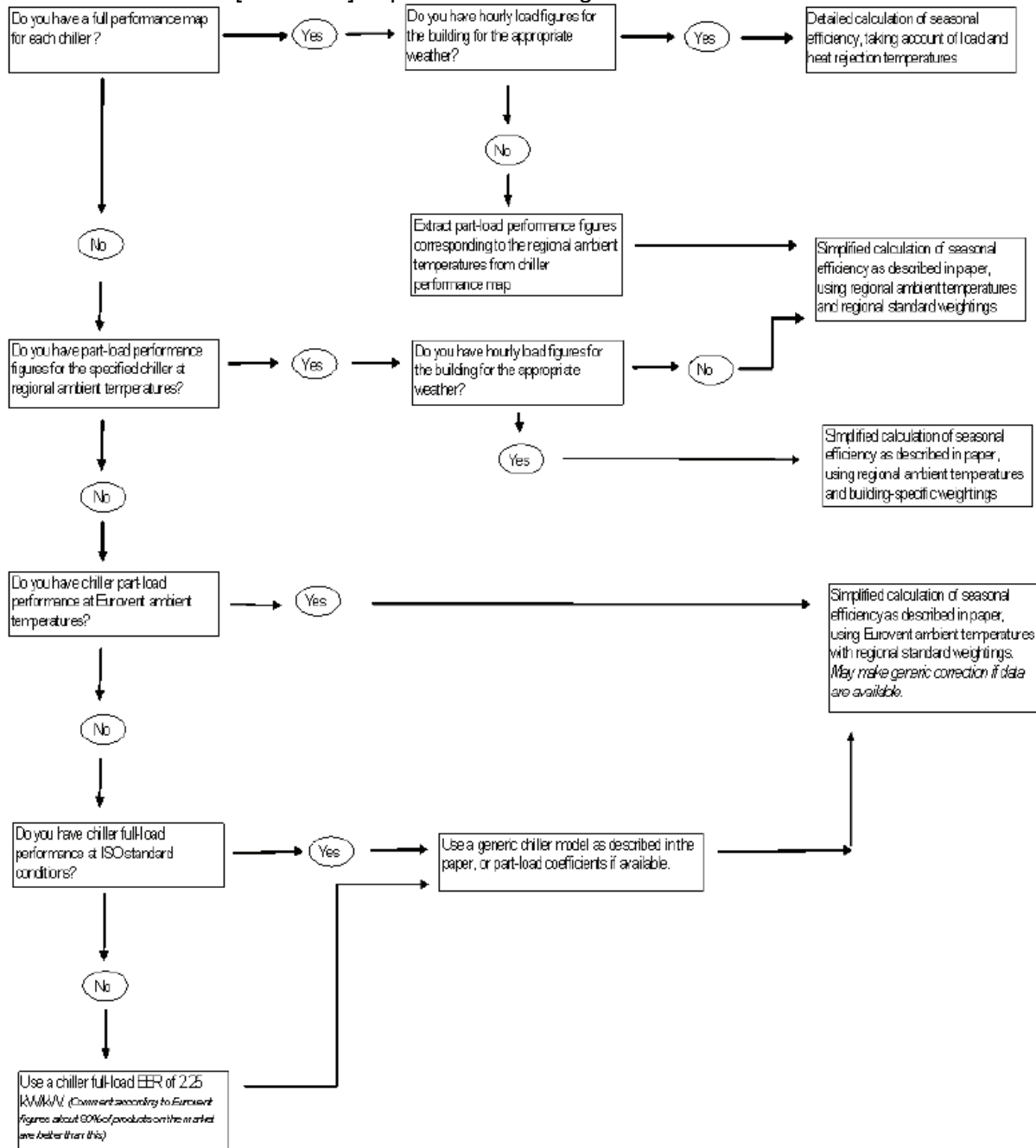


Figure 8-3 Hiérarchie de simplification de la procédure pour évaluer le SEER [EN15243]

Pour cette procédure d'évaluation de l'efficacité d'un groupe frigorifique, la disponibilité des informations est une entrée indispensable pour déterminer les valeurs par défaut à



utiliser. Ainsi, suivant cette disponibilité, il est possible d'utiliser soit une évaluation calculée et calibrée, soit une évaluation calculée et corrigée soit une évaluation calculée.

Par exemple, lorsqu'aucune information sur le groupe froid n'est disponible (dernière case en bas de la colonne de gauche), l'évaluation repose uniquement sur une unique valeur par défaut.

D'un autre côté, lorsque toutes les informations de l'installation existante sont disponibles (carte de performance complète, profil de besoin horaire en fonction de la température extérieure), l'évaluation se fait de manière détaillée (méthode calculée et calibrée), comme le demande la première ligne en haut (Figure 8-3).

Cette carte de performance peut être obtenue par les mesures expérimentales effectuées par le fournisseur, ou par un organisme de certification comme Eurovent, ou par des mesures ponctuelles de l'installation existante de la machine frigorifique réalisée antérieurement par l'équipe de maintenance ou tout autre organisme de commissionnement.

Ces différentes performances (cartes complètes, valeurs certifiées pour certaines conditions expérimentales, valeurs par défaut) permettent de définir plusieurs degrés de « précision » sur le fonctionnement de la machine frigorifique. Il est aisé de convenir que les mesures effectuées sur l'installation représentent le degré d'adaptation aux conditions d'utilisation le plus élevé, tandis que les mesures effectuées en laboratoire représentent le plus faible degré. Ainsi la procédure proposée dans cette norme repose sur la succession d'une recherche d'informations pour prendre en compte les spécificités du fonctionnement réel de l'installation.

Nous avons représenté dans un nouveau schéma (Figure 8-4) la procédure d'utilisation des informations disponibles de la Figure 8-3. Ceci nous permet d'introduire des notations utiles pour la généralisation de notre approche.

L'information de type A (couleur rouge) représente l'ensemble des informations concernant la performance de la machine frigorifique en cours d'inspection. Conformément à la procédure de [EN15243], ce type d'information est défini à partir de quatre informations dont chacune « s'écarte » des particularités de l'usage du système étudié. Lorsque l'information est disponible, les valeurs sont ensuite utilisées dans la suite de la procédure. Nous avons représenté ces valeurs à l'aide des rectangles arrondis violets. Un deuxième type d'information (information B) peut être disponible (couleur orange), ce type d'information représente le besoin horaire thermique de l'installation.

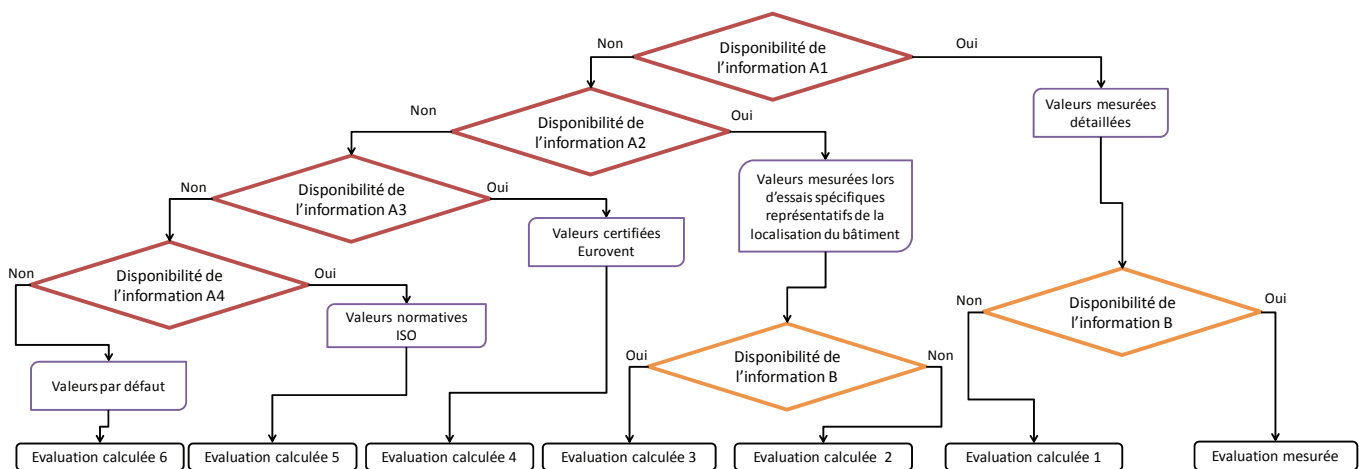


Figure 8-4 Nouvelle représentation de la procédure d'évaluation du SEER

Différentes évaluation sont ainsi réalisables. Ces évaluations sont obtenues soit par l'application d'une méthode simplifiée de calcul (méthode calculée ou calculée et



corrigée), soit lorsqu'une évaluation mesurée existe, par l'application d'une méthode plus détaillée (méthode calculée et calibrée).

Des coefficients par défaut permettent d'utiliser le modèle de calcul sans données mesurées. Comme nous l'avons indiqué au chapitre 3, paragraphe 3.4.3, ces coefficients doivent être établis par un benchmark réalisé à l'aide de facteurs de diversité du parc de bâtiments, de facteurs de diversité technique de certains facteurs de différenciation. Nous pouvons remarquer que dans la démarche explicitée à la Figure 8-4, la simplification de la procédure s'effectue en partant de points de mesures permettant de définir l'efficacité du groupe de production. En effet, les facteurs de diversité technique sont les facteurs les plus souvent accessibles lors d'une visite sur site ou par les informations fournies par le constructeur de matériel. C'est pourquoi la démarche adoptée pour calculer l'efficacité saisonnière du groupe de production peut reposer sur l'identification des facteurs de diversité technique puis sur l'utilisation de coefficients par défaut. Ainsi si les valeurs sont des valeurs consensuelles (certification, norme, valeurs par défaut), la procédure ne requiert pas la recherche de l'information relative au besoin thermique de l'installation.

L'approche générale que nous proposons d'utiliser peut se synthétiser à l'aide de la Figure 8-5, ce qui permet son extrapolation.

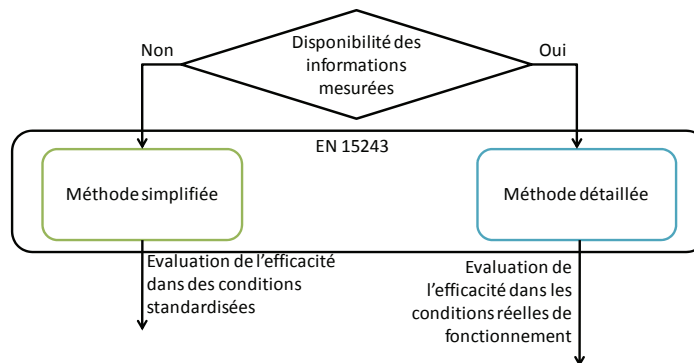


Figure 8-5 Proposition d'architecture pour l'évaluation de l'efficacité d'une machine frigorifique

### 8.3.2 Benchmark retenu pour évaluer l'efficacité du groupe de production

Nous proposons provisoirement de retenir comme méthode d'évaluation simplifiée, celle qui est développée dans [Riviere04]. Dans cette méthode de calcul, qui est reprise dans [EN15243], l'efficacité saisonnière (SEER) est évaluée à l'aide des performances à charge partielle dans les conditions Eurovent, et à l'aide de l'équation suivante.

$$SEER = A EER_{25\%} + B EER_{50\%} + C EER_{75\%} + D EER_{100\%}$$

Avec  $EER_{25\%}$ ,  $EER_{50\%}$ ,  $EER_{75\%}$ ,  $EER_{100\%}$ , respectivement l'efficacité pour une charge partielle de 25%, 50%, 75%, 100% et ce dans des conditions spécifique de température et de débit d'eau. A, B, C, D représentent respectivement les coefficients de pondération de chacune de ces charges partielles.

Cette méthode de calcul est une méthode calculée et corrigée à l'aide des coefficients de pondération. Ces coefficients sont évalués à partir des éléments qualitatifs suivants :

- Le type de système : centrale de traitement d'air à débit d'air constant (CAV), centrale de traitement d'air à débit d'air variable (VAV), ventilo-convecteurs à quatre tubes (FC4P), d'une combinaison centrale de traitement d'air à débit constant et ventilo-convecteurs à quatre tubes (CAV-FC).
- Le climat : Londres ou Milan ou Séville

Les coefficients de pondération (A, B, C, D) ont été calculés dans [EECCAC03] et sont repris dans le Tableau 8-3.

	Load	Temperatures (°C)				Weighting coefficients			
		100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%
Climate	System								
London	CAV	27.6	24.8	20.9	17.1	0.7%	9.7%	42.5%	47.1%
	CAV-FC	27.6	26.1	24.3	22.4	4.2%	26.7%	37.6%	31.5%
	FC4P	27.6	24.6	20.1	16.1	0.5%	8.7%	48.5%	42.3%
	VAV	27.6	25.6	22.4	17.6	1.1%	7.7%	29.1%	62.1%
Milan	CAV	31.2	28.0	23.1	18.1	3.6%	33.9%	41.7%	20.8%
	CAV-FC	31.2	28.0	24.8	22.0	5.7%	54.4%	31.1%	8.8%
	FC4P	31.4	28.1	23.1	17.7	3.1%	32.0%	40.5%	24.3%
	VAV	31.6	28.9	24.5	19.1	2.6%	30.7%	39.5%	27.2%
Seville	CAV	36.7	32.1	26.3	19.8	3.5%	38.2%	39.1%	19.2%
	CAV-FC	36.7	32.1	27.4	22.8	4.4%	47.5%	37.3%	10.7%
	FC4P	36.9	32.3	26.5	19.2	2.8%	35.3%	40.2%	21.7%
	VAV	37.2	33.4	28.0	21.1	1.6%	30.7%	43.9%	23.8%

Tableau 8-3 Coefficients de pondération et températures d'essais correspondant à différents systèmes et climats [IECCAC03]

Notons que le calcul de ces coefficients a été effectué en utilisant une méthode d'évaluation dynamique. Cette méthode d'évaluation a été appliquée pour prendre en compte les facteurs de diversité technique de l'équipement (type de condenseur, distribution d'air à vitesse constante en centrale, ventilo-convecteurs...) et les facteurs de diversité (parc de bâtiment pour trois climats). Un profil d'occupation de ces immeubles de bureaux a également permis de définir un facteur de différenciation. Ces différentes études ont permis de mettre au point un benchmark de coefficients de pondération pour les systèmes et climats représentatifs du parc européen de bâtiment de bureau.

Mais la principale difficulté d'utilisation de cette méthode réside dans le fait que les quatre points de mesure de performance ne sont le plus souvent pas disponibles dans la documentation du constructeur et encore moins pour les températures d'essais pour chacun des pays.

A défaut d'avoir directement la mesure de la performance du GPEG ou du SEER pondérées pour chacun des pays européen et ce pour des systèmes typiques, nous retenons par défaut l'unique valeur du SEER disponible sur le site internet de Eurovent [Eurovent] noté ESEER<sup>40</sup>. Notons que la typologie du système de climatisation a un impact limité sur le SEER [Riviere04]<sup>41</sup>. La valeur ESEER est donc représentative des systèmes et des climats.

Si cette information n'est pas disponible, c'est-à-dire pour les GPEG existants les plus anciens, nous proposons un benchmark permettant de l'évaluer en annexe 6. Pour effectuer cette évaluation, l'auditeur doit simplement reconnaître le type de compresseur utilisé et relevé sur la plaque du GPEG le EER à pleine charge.

### 8.3.3 Le régime de maintenance du groupe froid, une correction de l'efficacité ?

Dans le cas de la procédure proposée dans [EN15243], les valeurs par défaut sont des coefficients « idéaux ». Nous proposons de pouvoir **modifier cette efficacité de référence** à l'aide de mesures rapides et ponctuelles permettant de prendre en compte certaines **spécificités liées au régime de maintenance de l'installation**. Dans le but de combiner des valeurs par défaut et des valeurs obtenues sur le terrain, nous nous proposons de compléter la démarche générale que nous avons identifiée à la Figure 8-5 en y ajoutant une étape supplémentaire, nous l'avons représentée à la Figure 8-6.

<sup>40</sup> Cette valeur correspond à une pondération du SEER des différents systèmes et climats européens.

<sup>41</sup> L'impact du type de système (CAV, VAV, CAV-FC, FC-4P) sur le SEER est au maximum de l'ordre de 15%. Pour un système donné, l'impact du climat (Milan, Lisbonne, Londres) sur le SEER est au maximum de l'ordre de 10%. La différence entre le SEER et l'ESEER est au maximum de l'ordre de 10% pour la plupart des systèmes et climats. Cependant, notons une surévaluation de la performance de 18% par l'utilisation du ESEER pour le système VAV pour le climat londonien et un compresseur bi-vis.

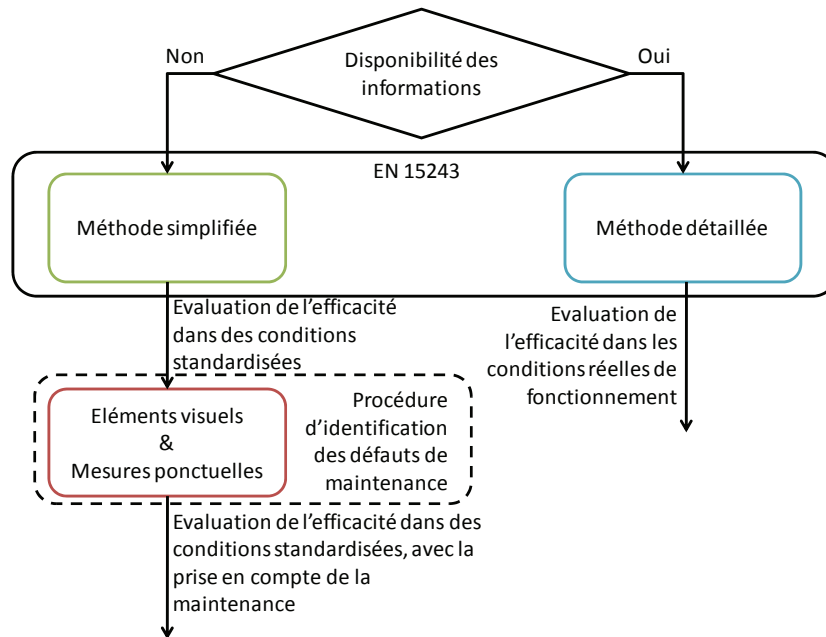


Figure 8-6 Architecture d'évaluation du SEER d'une machine frigorifique en exploitation

Dans le but de pénaliser le manque d'information sur la performance, nous devons tout d'abord identifier les défauts de maintenance de l'installation ayant un impact sur l'efficacité de la machine frigorifique.

Nous pouvons nous reporter au chapitre 3, paragraphe 3.2, qui nous indique comment procéder pour détecter des défauts de maintenance de l'installation. Nous rappelons que nous pouvons disposer de trois méthodes de détection et ce par ordre croissant de coût :

- L'utilisation d'un benchmark permettant de caractériser un optimum entre le coût d'une opération de maintenance et l'économie d'énergie associée.
- Un suivi régulier de l'installation consigné dans les rapports de maintenance ou dans une GMAO.
- Un suivi permanent des paramètres de fonctionnement de la machine frigorifique et des autres équipements.

Dans ces trois cas des règles expertes établissent le lien entre certains de ces points de contrôle et permettent de quantifier l'efficacité in-situ du système de production.

Comme nous l'avons remarqué au chapitre 3, paragraphe 3.2.2, un défaut de maintenance peut conduire à une augmentation de la puissance consommée par un groupe frigorifique. Nous rappelons les principaux défauts de maintenance d'un groupe et leurs conséquences sur la consommation électrique dans le Tableau 8-4.

Défaut	Puissance
Débit d'eau réduit au condenseur	++
Débit d'eau réduit à l'évaporateur	+
Fuite de réfrigérant	-
Surcharge de réfrigérant	++
Excès d'huile	++
Encrassement du condenseur	++
Présence d'incondensables dans le circuit frigorifique	+++
Vanne de détente defectueuse	+

Tableau 8-4 Tendence d'évolution de la puissance pour le diagnostic [Com02]

Certaines règles expertes ont déjà été quantifiées à l'aide d'un benchmark dans [Bory08]. Ce travail permet de corriger l'efficacité évaluée par la présence des défauts de maintenance suivant :

- Les fuites de fluide frigorigène
- La présence d'incondensables dans le condenseur
- L'encrassement côté air du condenseur
- Le détendeur obstrué
- Un manque d'huile dans le compresseur

Ces défauts de maintenance ne modifient pas la charge thermique du bâtiment, par contre, ils modifient la consommation.

Nous montrons un exemple de résultat de [Bory08] obtenu pour évaluer l'impact d'un encrassement du condenseur côté air dans la Figure 8-7.

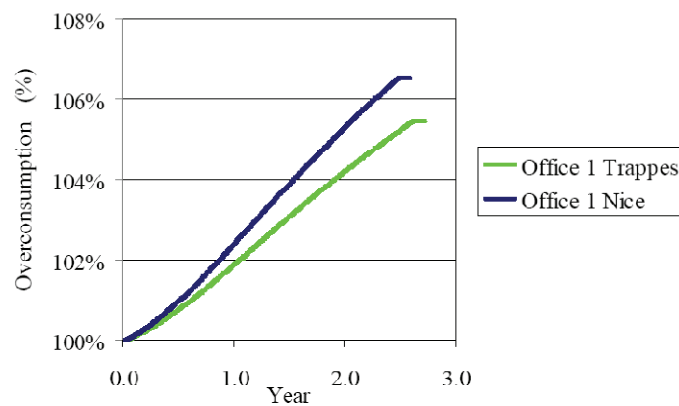


Figure 8-7 Consommation d'un groupe de production d'eau glacée refroidi à l'air avec un encrassement du condenseur et le bâtiment de bureau de Type 1 selon [Bory08]

Dans cet exemple, la consommation de la machine frigorifique augmente au fil du temps suite au dépôt de poussière sur l'échangeur. Plus le temps de fonctionnement de la machine est long plus l'encrassement est important. Par exemple, la surconsommation due à un encrassement est supérieure pour le climat de Nice que celle de Trappes. Ainsi la surconsommation atteint respectivement pour le climat de Nice, et celui de Trappes, une valeur d'environ 6.5% et 5.5% au bout d'environ deux ans et demi.

Sans document décrivant clairement la périodicité de nettoyage du condenseur, il est possible d'utiliser une **valeur pénalisante** pour évaluer le rendement de la machine de production à partir de l'efficacité initiale de l'installation ( $SEER_{ref}$ ). Par exemple pour Nice, et un bâtiment de type 1 de la typologie de [Bory08] cette valeur pénalisante serait :

$$SEER_{maintenance} = \frac{SEER_{ref}}{1.065}$$

Nous venons ainsi de proposer une méthode d'évaluation pour la machine frigorifique. Une valeur par défaut permet de **corriger en fonction du régime de maintenance**, la valeur d'efficacité obtenue par défaut dans la méthode simplifiée de [EN15243].

Toutefois une procédure doit être développée afin d'identifier les défauts de maintenance et d'estimer le niveau adéquate de dégradation. Cette procédure permettra alors d'associer la présence d'un défaut à la quantification de la correction à apporter au calcul normatif pour évaluer l'efficacité du groupe frigorifique.

## 8.4 Evaluation de la consommation des équipements en fonction de leurs spécificités de conception

Nous venons de proposer une méthode d'évaluation de la performance de la machine frigorifique qui peut être corrigée en fonction du type de système, de l'état de la maintenance.

Nous proposons de rechercher des méthodes permettant d'évaluer la consommation des autres équipements composant l'installation de climatisation. Ces méthodes nous permettent de compléter les informations nécessaires pour évaluer l'efficacité globale du système de climatisation.

Nous avons distingué deux méthodes d'évaluation :

- Une méthode utilisant directement des ratios (paragraphe 8.4.1)
- Une méthode requérant une évaluation de chacun des postes de consommation (paragraphe 8.4.4 pour les pompes de distribution, 8.4.5 pour les ventilateurs de distribution d'air, 8.4.6 pour les émetteurs et 8.4.7 pour les tours de refroidissement)

### 8.4.1 Evaluation de la consommation du GPEG par défaut

Lorsqu'aucune donnée n'est disponible, il est possible d'utiliser des benchmarks existants. Par exemple, l'étude [EECCAC03] permet d'établir les consommations des du GPEG et des auxiliaires.

	Consommation kWh / m <sup>2</sup>	
	Séville	Londres
Compresseur	46,8	10,0
Condenseur	5,8	1,6
Total	52,6	11,6

*Tableau 8-5 Consommations des postes pour un GPEG refroidi à l'air, une CTA et des ventilo-convecteurs pour Séville et Londres, adapté de [EECCAC03]*

Cependant, il est important de souligner que ces valeurs ont été calculées en spécifiant certaines propriétés techniques du GPEG et d'un bâtiment spécifique.

Par exemple, la consommation du GPEG nous permet d'estimer le besoin frigorifique du bâtiment. Pour Séville, cette consommation thermique s'élève à environ 100 kWh<sub>th</sub>/m<sup>2</sup> en utilisant un SEER de 1.92. En supposant que le bâtiment existant est équivalent à celui de [EECCAC03], il est possible d'estimer la consommation d'un autre type de GPEG dont le SEER est égale à 2.5. La consommation électrique de ce GPEG peut alors être estimée à environ 40 kWh/m<sup>2</sup>.

Mais nous proposons également de compléter cette base de données en utilisant une typologie de bâtiment supplémentaire. Au tableau suivant nous proposons un benchmark pour évaluer la puissance frigorifique par mètre carré en fonction du climat, du type de bâtiment pour un système à débit d'air constant [Keepcool10]

	Besoin frigorifique kWh/m <sup>2</sup>	
	Type 1c	Type 3
Paris	48,2	36,4
Milan	70,3	39,8
Lisbonne	113	69,4

Tableau 8-6 Benchmark du besoin thermique de bâtiments représentatifs du parc [Keepcool10]<sup>42</sup>

Notons que ces valeurs ont été obtenues pour des bâtiments dont les caractéristiques de l'enveloppe sont représentatives de celles existantes et sans aucune amélioration spécifique de réduction des gains internes ou externes.

Pour évaluer la consommation électrique d'un GPEG, nous proposons de retenir les valeurs du Tableau 8-6 et de les combiner avec la procédure d'évaluation du SEER du paragraphe précédent. En effet le SEER s'écrit :

$$SEER = \frac{C_{th}}{C_1}$$

Nous rappelons que la procédure d'évaluation du SEER prend en compte les spécificités techniques du GPEG. En effet, même si le SEER n'est pas disponible par les données du constructeur, le SEER évalué à l'aide d'un benchmark dépend du type de compresseur (voir annexe 6).

Notons qu'il est toutefois indispensable d'adapter les valeurs du Tableau 8-6 en fonction des caractéristiques du bâtiment existant (isolation, vitrages performants, équipements de bureautique et éclairages performants).

#### 8.4.2 Evaluation de la consommation des autres postes de consommation

Pour évaluer la consommation des autres postes de consommation (cf. Tableau 8-5), il est possible d'utiliser des ratios existants de consommation [EECCAC03].

	Consommation kWh / m <sup>2</sup>	
	Séville	Londres
Ventilateurs	12,8	6,3
Pompe	10,6	1,4

Tableau 8-7 Consommations des auxiliaires (réseau hydraulique et aéraulique), adapté de [EECCAC03]

Cependant, il est important de souligner que ces valeurs ont été calculées en spécifiant certaines propriétés techniques des équipements et celles d'un bâtiment adaptées au climat. Toutefois, la typologie de bâtiment peut directement conditionner le temps de fonctionnement des équipements et donc impacter la consommation si les équipements sont pilotés uniquement par la charge thermique.

A titre d'exemple, nous avons calculé le temps pour lequel le besoin de climatisation est non nul.

<sup>42</sup> Notons que les caractéristiques de la typologie de bâtiment utilisée pour l'étude [EECCAC03] tendent à se rapprocher de celle du Type 1c, c'est pourquoi les besoins thermique sont proches.

		Temps de fonctionnement pour une charge thermique non nulle (h)
Type 3	Paris	1200
	Lisbonne	1996
	Stockholm	1291
	Turin	791
Type 2	Paris	1090
Type 1c	Paris	1276
	Lisbonne	2505
	Stockholm	1468
	Turin	1275
Type 1b	Paris	1234
Type 1a	Paris	1417

Tableau 8-8 Exemple de temps de fonctionnement à charge thermique non nulle

Dans le cas d'un contrôle par la charge<sup>43</sup> il peut exister une disparité non négligeable entre les différentes consommations (en fonction de la typologie du bâtiment et du climat).

Cependant la plupart des installations sont contrôlées par trois modes principaux de fonctionnement, il est donc possible de déterminer facilement le temps total de fonctionnement :

- Un fonctionnement annuel ( $t_{tot} = 8760$  heures / an)
- Une programmation hebdomadaire permettant un arrêt le week-end ( $t_{tot} = 6456$  heures / an)
- Une programmation hebdomadaire et journalière (par exemple  $t_{tot} = 3324$  heures / an)

Il est maintenant nécessaire d'expliciter la puissance électrique des différents composants en considérant leurs spécificités de conception. Nous proposons de nous appuyer sur la norme [EN15243] pour considérer les spécificités de conception des équipements.

#### 8.4.3 Proposition pour l'évaluation des consommations

Nous nous proposons de chercher à exprimer la consommation d'un poste à l'aide de l'équation suivante :

$$C_i = f_{conception} f_{charge} t_{fonctionnement} P_{nom} = f_{conception} f_{exploitation} P_{nom}$$

Le facteur  $f_{exploitation}$  représente le nombre d'heures de fonctionnement équivalent à pleine charge du poste. Ce coefficient est directement lié aux spécificités d'exploitation du système. Pour un système fonctionnant toujours à pleine charge, le coefficient  $f_{charge}$  est égal à 1. Notons également que le facteur  $f_{charge}$  doit inclure le rendement à charge partielle de l'équipement. Ce rendement est généralement lié au rendement nominal de l'équipement.

Le facteur  $f_{conception}$  est directement lié aux spécificités de conception du système. La puissance nominale d'un équipement est également liée aux spécificités de conception.

Dans les paragraphes suivants nous nous attachons particulièrement à détailler les facteurs  $f_{conception}$  en nous appuyant sur [EN15243] et à guider l'inspecteur pour évaluer la puissance nominale des postes.

<sup>43</sup> On entend contrôle par la charge, que les équipements ne fonctionnent uniquement que lorsque la charge thermique est non nulle.



#### 8.4.4 Evaluation de la consommation du réseau de distribution d'eau

La norme [EN15243] définit une méthode de calcul pour évaluer la puissance de la pompe. Une méthode simplifiée et une méthode détaillée sont proposées pour calculer la puissance hydraulique de la pompe ( $P_{hydrau}$ ). La méthode simplifiée est basée sur un ensemble d'approximations effectuées à l'aide de valeurs par défaut (différence de température aux bornes des émetteurs, perte de charge des émetteurs et de la tuyauterie). La méthode détaillée est basée sur les résultats obtenus par une étude de conception du réseau. Dans ce cas, les pertes de charges ne sont pas estimées par des valeurs par défaut mais par les pertes de charge calculées à l'aide des abaques des équipements (tuyaux, échangeurs, vannes...).

Un rendement du système de pompage est proposé par défaut, mais celui-ci peut être corrigé en fonction de spécificités de conception. Il existe les facteurs de correction suivants :

- Le coefficient  $f_{adapt}$  pour l'adaptation de la pompe sur le réseau : le point de dimensionnement ne correspond pas forcément au point de meilleur rendement<sup>44</sup>.
- Le coefficient  $f_{equi}$  pour tenir compte l'équilibrage hydraulique du réseau<sup>45</sup>.
- Le coefficient  $b$  pour prendre en compte la catégorie du bâtiment (existant ou neuf).

La procédure d'évaluation de la consommation de la pompe se synthétise donc de la même manière que celle utilisée pour évaluer l'efficacité de la machine frigorifique. De nombreuses informations sont disponibles par défaut afin d'évaluer la puissance, puis la consommation du système de pompage du réseau de distribution d'eau glacée.

Notons également que nous avons déjà estimé la puissance électrique des pompes de bâtiments représentatifs du parc et d'une pompe de performance moyenne (cf. chapitre 6, Tableau 6-31).

Afin de proposer une procédure d'inspection réglementaire par défaut de la mesure du différentiel de pression du réseau, nous proposons d'utiliser la procédure d'évaluation du chapitre 6, paragraphe 6.7. Mais, dans cette procédure, nous proposons de corriger la consommation en incluant les facteurs de correction relatifs à l'adaptation et à l'équilibrage du réseau hydraulique.

Ainsi la consommation d'une pompe d'une installation existante s'écrit :

$$C_2 = f_{conception} f_{exploitation} P_{pompe}$$

Avec :

$$f_{conception} = f_{adapt} f_{equi}$$

Et avec :

$$\begin{cases} f_{exploitation} = t \text{ pour une pompe à vitesse fixe} \\ f_{exploitation} = t (1 - E_{\%VSD}) \text{ pour une pompe à vitesse variable} \end{cases}$$

<sup>44</sup> Trois valeurs sont à distinguer : une valeur de 1 lorsque la pompe est parfaitement adaptée ; une valeur de 1.2 lorsque qu'aucune information ne permet de vérifier l'adaptation ; une valeur de 1.05 lorsque qu'aucune information ne permet de vérifier l'adaptation et si un variateur de vitesse est utilisé.

<sup>45</sup> Deux valeurs sont à distinguer : une valeur de 1 lorsque le réseau possède des vannes d'équilibrage, une valeur de 1.25 lorsque celui-ci n'en possède pas. En effet, une mauvaise solution pour remédier à l'absence de vannes d'équilibrage est d'installer une pompe surdimensionnée (voir paragraphe 2.3.1). En faisant cette hypothèse, on suppose donc que la température du réseau n'a pas été modifiée.



Le coefficient  $E_{\%VSD}$  est celui que nous avons calculé au chapitre 6, au Tableau 6-26 et au Tableau 6-27.

Afin d'appliquer cette méthode d'évaluation, une procédure d'identification de ces coefficients correcteurs doit être utilisée.

#### 8.4.5 Evaluation de la consommation du réseau de distribution d'air

Nous proposons d'élaborer, d'une manière similaire au système de pompage, une méthode d'évaluation de la consommation du système de ventilation primaire. Autrement dit nous proposons d'évaluer la consommation du système de ventilation d'une centrale de traitement à débit d'air constant ou variable.

Le débit de l'installation peut être estimé à l'aide du débit d'air extérieur minimal défini dans la réglementation en vigueur. En France cette valeur est fixée à 25 m<sup>3</sup>/h/personne pour des bureaux [CodeTravail].

La différence de pression peut être estimée à l'aide des éléments typiques d'une centrale de traitement d'air et des pertes de charges du réseau. Dans [EN13779], les pertes de charges caractéristiques des éléments d'une centrale sont proposées.

Composant	Pertes de charge en Pa		
	Basse	Normale	Forte
Réseau de conduits d'air fourni	200	300	600
Réseau de conduits d'air rejeté	100	200	300
Serpentin de chauffage	40	80	100
Serpentin de rafraîchissement	100	140	200
Appareil de récupération de chaleur H3 <sup>a)</sup>	100	150	250
Appareil de récupération de chaleur H2-H1 <sup>a)</sup>	200	300	400
Humidificateur	50	100	150
Laveur d'air	100	200	300
Filtre à air F5-F7 par section <sup>b)</sup>	100	150	250
Filtre à air F8-F9 par section <sup>b)</sup>	150	250	400
Filtre à air de particules à haute efficacité	400	500	700
Filtre à gaz	100	150	250
Silencieux	30	50	80
Dispositif terminal	30	50	100
Bouche de soufflage et d'extraction	20	50	70
<sup>a)</sup> Classe H1 — H3 conformément à l'EN 13053.			
<sup>b)</sup> Perte de charge finale avant remplacement.			

*Tableau 8-9 Pertes de charge caractéristiques des éléments d'une centrale de traitement de l'air extrait de [EN13779]*

Pour la perte de charge du réseau, une valeur comprise en 0.5 et 4 Pa/m est en pratique utilisée pour la conception du réseau d'air [BouteloupD98] au régime nominal.

Ainsi nous proposons de calculer la puissance hydraulique d'un système à débit fixe à l'aide de ces valeurs par défauts.

Dans [EN15241], nous notons l'existence de coefficients correcteurs pour prendre en compte le moyen de régulation de la vitesse (registre, vanne, variation de vitesse) et ce pour deux types de ventilateurs (axial, centrifuge à aubes inclinées vers l'avant ou vers l'arrière). Ce coefficient correcteur peut être utilisé si le débit nominal de l'installation a été modifié lors de l'exploitation des équipements. Par exemple, si l'occupation du bâtiment a diminué, le manager peut avoir fait modifier le débit. L'évaluation de la puissance du ventilateur doit donc prendre en compte ce facteur correctif.

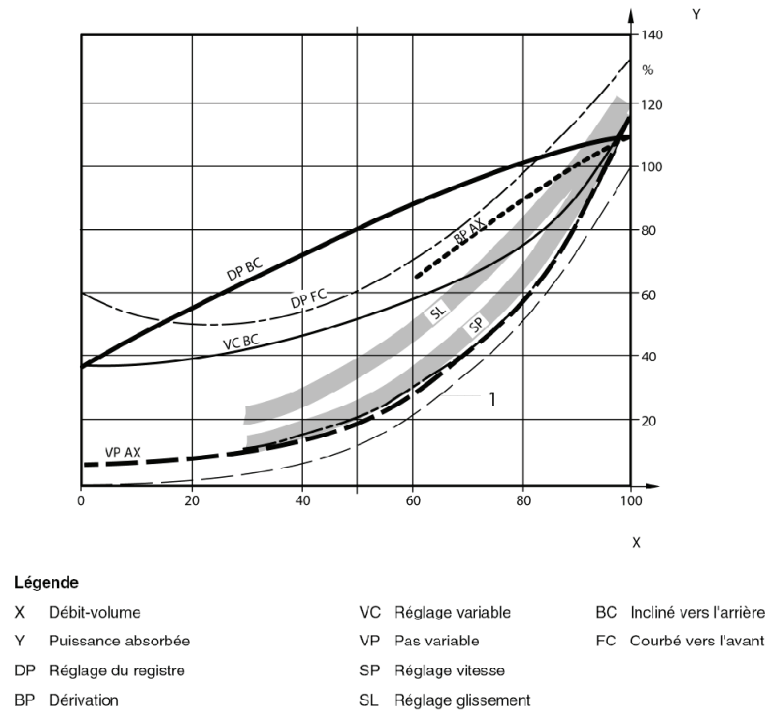


Figure 8-8 Coefficient correcteur pour la prise en compte d'une correction du débit [EN15241]<sup>46</sup>

La consommation du système de ventilation s'écrit :

$$C_4 = f_{conception} f_{exploitation} P_{ventilateur CTA}$$

Avec  $P_{ventilateur CTA}$  déterminé pour le débit minimal hygiénique et sa perte de charge associée. Le coefficient  $f_{conception}$  est déterminé en fonction du débit réel de l'installation et à partir de la figure précédente. Une procédure d'évaluation du débit réel est donc indispensable.

Notons, qu'il est également envisageable d'utiliser les mêmes coefficients correcteurs pour améliorer la conception du réseau aéraulique. Par exemple il est possible de remplacer un registre qui est utilisé pour une réduction de débit. Ce remplacement est effectué par la mise en place d'un variateur de vitesse. A titre d'exemple, si l'inspecteur a identifié qu'une réduction de débit par un registre de 40% à été appliquée à l'installation pour un ventilateur courbé vers l'avant, un coefficient correcteur de 0.5 peut être appliqué à l'ancienne puissance (cf. Figure 8-8 : comparaison entre la courbe DP FC et la courbe SP).

Le coefficient  $f_{exploitation}$  pourrait être évalué à l'aide de la même démarche que celle que nous avons employée pour les pompes au chapitre 6. Notons que pour un système à débit d'air variable  $f_{exploitation}$  est, au minimum égal à 0.25 [EECCAC03].

#### 8.4.6 Evaluation de la consommation des émetteurs

La norme [EN15243] propose de calculer la puissance des ventilateurs utilisés par les émetteurs disposés dans les pièces du bâtiment. La consommation s'exprime à l'aide de l'équation suivante.

$$P_{emetteur} = f_{ce aux} C_{th} \frac{t_{clim}}{1000}$$

<sup>46</sup> Notons que le coefficient correcteur n'est pas égal à 1 pour le débit nominal de l'installation, un coefficient correcteur a sans doute été utilisé pour prendre en compte la différence entre le point de meilleure efficacité et point de fonctionnement nominal.

Avec  $t_{clim}$  la durée de la demande thermique des locaux<sup>47</sup>. La puissance des émetteurs est calculée sur la base de 1000 heures de fonctionnement. Nous ne pouvons pas dire si le coefficient  $f_{c\ ce\ aux}$  combine les coefficients  $f_{exploitation}$  et  $f_{conception}$ .

Un benchmark de consommation est proposée au tableau suivant pour évaluer le facteur  $f_{c\ ce\ aux}$ .

	Puissance nominale kW/kW	$f_{c,ce,aux}$ kWh/kWh
Systèmes de traitement d'air : unité interne DX avec distribution d'air via des conduits et les systèmes individuels de ventilation	0,030	0,060
Systèmes de traitement d'air: unité interne DX avec diffuseurs au plafond	0,020	0,040
Systèmes de traitement d'air : unité inter DX, unités murales et unités montés sur le parapet	0,020	0,040
Ventilo-convecteur à eau froide, parapet et unités montées au plafond avec eau froide à 6 °C	0,020	0,040
Ventilo-convecteur à eau froide, parapet et unités montées au plafond avec eau froide à 14 °C	0,035	0,070
Ventilo-convecteur à eau froide, unités montées au plafond avec distribution de l'air via des conduits, eau froide à 14 °C	0,040	0,080

Tableau 8-10 Valeurs normatives de la demande d'énergie des ventilateurs, extrait de [EN15243]

Notons que ce benchmark permet de hiérarchiser la performance des différents systèmes d'émission. Il n'est pas étonnant de remarquer que la consommation de ventilo-convecteurs fonctionnant à un régime élevé de température est supérieure à celle d'un régime faible de température.

Par conséquent, si l'inspecteur souhaite quantifier l'impact d'une exploitation du réseau d'eau en fonction du régime de température d'eau, nous lui proposons de retenir une valeur de 1.75 pour corriger la consommation du système de ventilation des émetteurs terminaux de type ventilo-convecteurs<sup>48</sup>. Même si cette valeur peut sembler importante, cet effet interactif doit pourtant être considéré.

#### 8.4.7 Evaluation de la consommation des tours de refroidissement

La puissance des tours de refroidissement se décompose en deux parties :

- La puissance de la pompe qui est dimensionnée à l'aide de la puissance calorifique à évacuer
- La puissance des ventilateurs

Pour la pompe, la puissance à évacuer s'écrit à l'aide de l'équation suivante :

$$P_{th\ nominal} = P_{frigo\ nominal} \left( 1 + \frac{1}{EER} \right)$$

Pour le système de ventilation utilisé pour le refroidissement du groupe frigorifique, la puissance peut être estimée en fonction de la puissance calorifique évacuée. Une méthode simplifiée peut ainsi être utilisée. Cette méthode repose sur un facteur d'utilisation moyen ( $f_{charge}$ )<sup>49</sup> une puissance spécifique des ventilateurs (cf. tableau ci-dessous) et du temps de fonctionnement.

$$C_{tour} = P_{th\ nominal} q_r f_{charge} t$$

<sup>47</sup> Notons que pour cette approche, il est par conséquent supposé que les ventilateurs de ces émetteurs sont considérés à l'arrêt lorsque le besoin de climatisation est non nul.

<sup>48</sup> Cette valeur correspond à une modification de la température du réseau de 6°C à 14°C (voir tableau Tableau 8-10).

<sup>49</sup> Une méthode est disponible pour évaluer ce coefficient dans [EN15243].

	Tour de refroidissement ou condenseur évaporatif (incluant les pompes de pulvérisation de l'eau)		Refroidisseur sec
	Circuit fermé	Circuit ouvert	
	$q_{R,electr}$ kW/kW		
Avec silencieux supplémentaire (ventilateur axial)	0,033	0,018	0,045
Sans silencieux supplémentaire (ventilateur radial)	0,040	0,021	—

Tableau 8-11 Puissance spécifique du système de ventilation utilisé pour le refroidissement du groupe frigorifique, extrait de [EN15243]

Le coefficient  $q_r$  intègre directement les spécificités de conception de la tour (type de ventilateur et présence d'un silencieux). Nous proposons d'utiliser les coefficients correcteurs du tableau suivant pour un changement de technologie de la tour.

	Circuit fermé	Circuit ouvert
Ventilateur axial (avec silencieux) / Ventilateur radial sans silencieux	0,83	0,86

Tableau 8-12 Passage d'un ventilateur radial à un ventilateur axial

#### 8.4.8 L'évaluation quantitative des spécificités de conception

Dans la partie 8.3, nous avons cherché à évaluer l'efficacité du groupe de production puis dans cette partie la **consommation individuelle** de chacun des équipements pour une période donnée.

En effet, nous avons proposé deux méthodes d'évaluation de la consommation des auxiliaires :

- La première est rapide et facile d'utilisation, elle permet d'évaluer la consommation des postes en ne connaissant que le climat et le type de système
- La seconde est plus complexe d'utilisation. Mais elle peut permettre de prendre en compte des spécificités d'exploitation, de conception et d'installation. Notons également qu'il est nécessaire d'évaluer le temps de fonctionnement de l'installation

Cependant, nous remarquons que deux cheminements sont possibles pour évaluer le SEER et les consommations. Même si la seconde approche est plus complexe, elle pourrait être intégrée dans un outil d'aide à la décision pour faciliter le travail de l'inspecteur.

Lorsque les mesures détaillées sont peu disponibles nous avons proposé des valeurs par défaut pour chacun des équipements. Nous avons également proposé de **corriger** certaines de ces valeurs pour prendre en compte des spécificités des équipements existants comme l'équilibrage, l'adaptation du dimensionnement pour calculer la consommation du système de pompage. Ces aspects constituent des **spécificités de conception du système**.

Si l'on connaît la consommation de ce groupe frigorifique, il nous est alors possible d'évaluer le besoin thermique de l'installation. Dans ce cas si l'on connaît la consommation des autres équipements, il nous est possible de calculée directement l'efficacité globale du système (SSEER). Dans le cas contraire, lorsque ces différentes données ne sont pas disponibles, nous devons rechercher une valeur par défaut permettant de calculer le SSEER de l'installation. Cette valeur par défaut peut être

obtenue en utilisant les valeurs par défauts de consommation de chacun des postes énergétiques précédents<sup>50</sup>.

Nous pouvons donc compléter la démarche que nous avons élaborée au paragraphe 8.3.3 à la Figure 8-6 en introduisant une évaluation par défaut de la consommation des postes énergétiques (Figure 8-9)<sup>51</sup>.

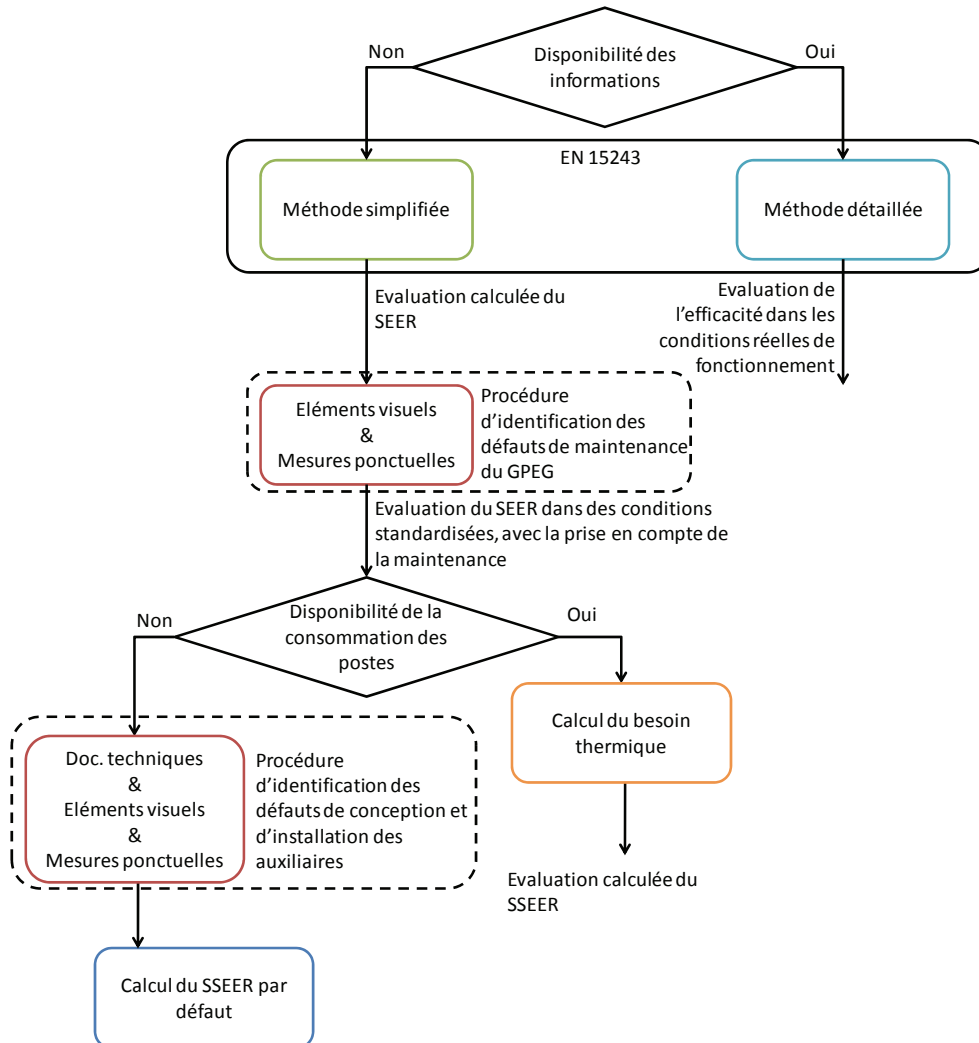


Figure 8-9 Procédure d'évaluation du SSEER avec correction de la maintenance et la conception

Afin de relier cette procédure d'évaluation à une procédure d'inspection, il est nécessaire de formuler une procédure complémentaire permettant d'identifier ces spécificités.

De plus, certaines spécificités ne sont pas prises en compte dans l'évaluation de l'efficacité globale (SSEER). On peut par exemple citer des mesures de réduction du besoin thermique de l'installation ou bien encore certaines fonctions de régulation.

Nous proposons d'examiner, dans les paragraphes suivants, différentes combinaisons de fonctions de régulation et de quantifier leurs impacts sur le SSEER.

<sup>50</sup> Notons qu'un ensemble de sous compteurs permet de mesurer individuellement de tous les postes. Il serait par conséquent envisageable d'utiliser la mesure des postes lorsqu'elle est disponible.

<sup>51</sup> Il est envisageable d'ajouter une branche à cette figure, si la mesure de certains postes est disponible. Cependant, compte tenu de l'expérience [HarmonacFT10], le sous comptage est souvent absent en France, il existe uniquement des mesures ponctuelles pour des installations de taille importantes.

## 8.5 Evaluation quantitative de l'efficacité de l'exploitation

Nous avons proposé une méthode permettant d'évaluer l'efficacité technique des composants de l'installation de climatisation. Cependant, l'exploitation de ces équipements n'a pas totalement été prise en compte dans cette méthode. Dans un premier temps, nous proposons de ne considérer que la correction due aux **spécificités de la régulation des équipements**.

### 8.5.1 Intégration de la correction de l'efficacité de l'exploitation

Pour une évaluation calculée de l'efficacité globale de l'installation de climatisation, nous proposons d'intégrer ces différentes spécificités, et ce pour tous les composants et pour le système de régulation.

La démarche que nous avons proposée à la Figure 8-5 permet d'évaluer l'efficacité du groupe frigorifique (SEER) en prenant en compte son régime de maintenance. Si l'on connaît la consommation de ce groupe frigorifique, il nous est alors possible d'évaluer le besoin thermique de l'installation. Alors si l'on connaît la consommation des autres équipements, il nous est possible de calculer directement l'efficacité globale du système (SSEER). Dans le cas où ces différentes données ne sont pas disponibles, nous devons rechercher une valeur par défaut permettant de calculer le SSEER de l'installation<sup>52</sup>.

Nous avons schématisé cette nouvelle procédure de calcul à la Figure 8-10.

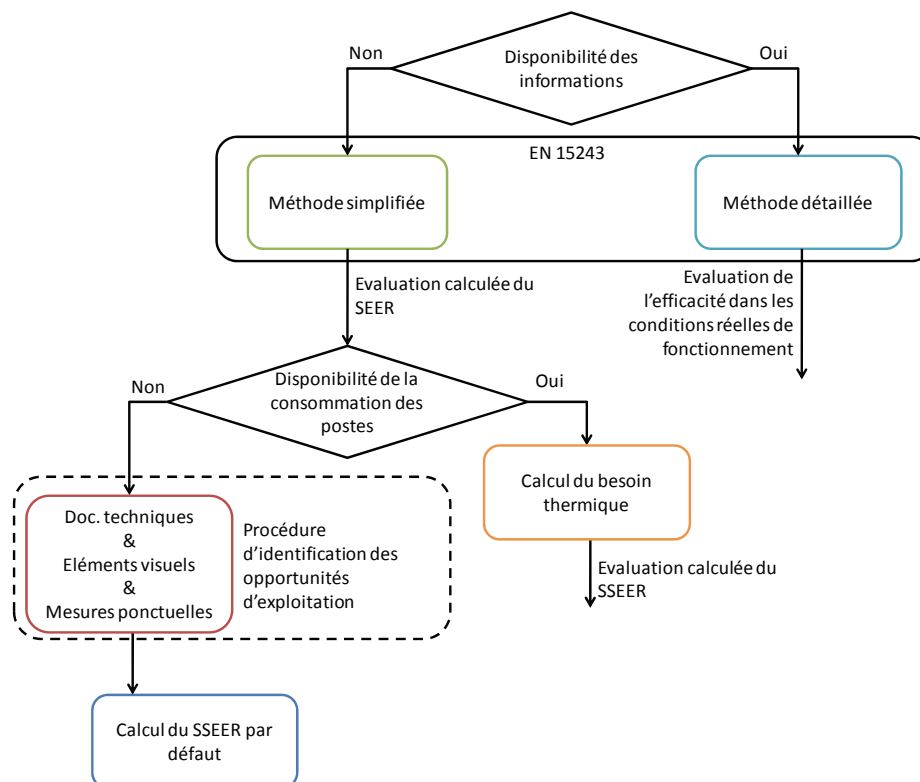


Figure 8-10 Procédure d'évaluation du SSEER avec correction de la régulation

Nous cherchons donc à établir une méthode de calcul pour évaluer par défaut le SSEER du système de climatisation.

Nous définissons le dispositif de régulation comme l'ensemble de fonctions permettant de contrôler les équipements constituant l'ensemble de l'installation de climatisation. Il peut être individualisé au niveau de chacun des équipements ou centralisé.

<sup>52</sup> Notons qu'un ensemble de sous compteur permet de réaliser la mesure de tous les postes.

En France, le terme de Gestion Technique du Bâtiment (GTB) inclut un dispositif de régulation centralisé permettant de piloter de façon centrale tous les composants de l'installation. Nous supposons qu'une équivalence existe entre un système de régulation individualisé au niveau de chacun des équipements et ce système de GTB.

Nous proposons de nous appuyer sur la norme [EN15232], dans laquelle deux méthodes sont présentées. Ces méthodes permettent d'évaluer l'impact du système de régulation et de gestion technique du bâtiment (GTB) sur la consommation du système de climatisation et les besoins thermiques du bâtiment et donc sur l'efficacité globale de l'installation de climatisation.

Les deux principales méthodes permettant de calculer l'impact d'une GTB sur l'efficacité du système de climatisation :

- Une méthode détaillée qui est une **approche globale** du système. Cette approche repose sur la définition de classes d'efficacité chacune d'elle étant définie par un ensemble de fonctions minimales. Il y a quatre classes notées A, B, C et D, la plus efficace étant la classe A.
- Une méthode simplifiée qui est une **approche par isolement** des différentes fonctions.

Nous analysons dans les paragraphes suivants laquelle de ces approches est la plus facilement transposable dans notre démarche de procédure réglementaire.

### 8.5.2 Evaluation de l'exploitation du système par une approche globale

Ayant défini la classe normative d'efficacité de la GTB existante, il est possible de traduire l'effet de la consommation énergétique du système de climatisation et de la puissance thermique par deux facteurs de correction. Ces facteurs sont respectivement notés  $F_C$  et  $F_{th}$ , par rapport à un système de classe C. L'efficacité saisonnière globale du système de climatisation s'exprime en fonction de l'efficacité du système de climatisation de référence à l'aide de l'équation suivante.

$$SSEER = SSEER_{ref} \frac{F_{th}}{F_C} = SSEER_{ref} F_{global}$$

On notera que pour chaque classe d'efficacité, un couple unique de facteur d'efficacité existe. Autrement dit l'interaction entre le besoin thermique annuel et la consommation des postes de consommation a été prise en compte.

Nous donnons ci-dessous les facteurs  $F_{global}$  calculés à partir de [EN15232], le système de régulation de référence étant un système de classe C.

Classe d'efficacité	D	C	B	A
Facteur d'efficacité globale	1.37	1.00	0.86	0.80

Tableau 8-13 Facteurs globaux d'efficacité d'une GTB pour les bureaux d'après [EN15232]

Les différentes classes d'efficacité permettent de distinguer **les spécificités d'exploitation** d'un système de climatisation. Ces spécificités d'exploitation sont des actions d'adaptation de la production au besoin thermique et qui ne détériorent pas le confort de l'occupant.

La méthode simplifiée prend en compte l'ensemble des fonctionnalités du système de régulation. Il est donc possible que pour un système particulier la classe normative de la GTB existante ne soit pas exactement définissable.

Dans ce cas particulier, seul une méthode détaillée pourrait être utilisée, au sens normatif, afin de prendre en compte les spécificités d'un système existant. Par exemple d'autres fonctions comme le rafraîchissement mécanique nocturne ou la commande automatique de l'éclairage peuvent être utilisées sans aucune régulation spécifique du système de régulation d'eau.



Nous pouvons supposer dans ce cas particulier que la classe d'efficacité de la GTB est définie par la première classe inférieure. Par exemple pour un système de régulation comportant toutes les fonctions de la classe C sauf celle de la motorisation des stores, ce système de GTB est classifié dans la classe D.

Cette méthode d'évaluation a donc pour conséquence de pénaliser les systèmes de régulation comportant peu de fonctions. En effet, ces types de systèmes seront majoritairement classés directement dans une classe d'efficacité normative inférieure.

En supposant un classement de la GTB existante, la méthode globale d'évaluation proposée dans [EN15232] permet de prendre en compte certaines combinaisons de fonctions utilisées pour l'exploitation du système de climatisation. D'autre part si l'efficacité d'un système typique de classe C est disponible, nous pourrions évaluer l'efficacité d'un système par défaut d'information.

#### 8.5.3 Evaluation de l'exploitation du système par une approche par isolement

Nous avons examiné les normes associées à chacune des fonctions afin de déterminer de manière individuelle les facteurs de correction thermiques et électriques. Pour la régulation du chauffage, la plupart de coefficients correcteurs sont définissable par des valeurs par défaut mais en climatisation aucune norme n'est disponible pour les déterminer.

#### 8.5.4 Sélection d'une approche pour prendre en compte l'effet de la régulation

Nous avons examiné l'approche développée dans la norme [EN15232]. Plusieurs méthodes sont proposées pour calculer l'efficacité saisonnière globale de l'installation.

La méthode globale est la plus simple d'utilisation. Cependant cette méthode requiert une définition de l'efficacité globale de l'installation équipée d'un système de classe C. L'inspecteur devra identifier le classement de la GTB existante en répertoriant les différentes fonctions du système de contrôle.

Une méthode par isolement, plus détaillée, peut être utilisée en individualisant l'impact des fonctions du système de régulation. Cependant, les coefficients correcteurs par défaut, permettant de corriger la consommation ne sont pas disponibles pour notre cadre d'application. Dans cette approche, l'inspecteur devra alors identifier chacune des fonctions et individualiser et calculer les corrections adéquates à apporter.

Compte tenu de ces différentes remarques, nous proposons de retenir la première approche. Nous devons donc établir un rendement pour une GTB en ne prenant en compte ni le régime de maintenance ni les spécificités de conception des équipements. Ainsi nous nous attachons uniquement à examiner les fonctions de régulation de la classe C.

#### 8.5.5 Stratégie de calcul pour déterminer l'efficacité d'un système de régulation de classe C

Nous proposons de déterminer le rendement global d'une installation équipée d'une GTB de classe C ( $SSEER_{classeC}$ ) en corrigeant les données d'une installation se rapprochant de ce type d'installation.

Les types de fonction d'un dispositif de régulation, définie dans [EN15232], influençant le besoin thermique du bâtiment et la consommation des équipements sont présentées dans Tableau 8-14. Nous avons également résumé les fonctions associées minimales pour obtenir une classe d'efficacité de classe C au sens de [EN15232] qui constitue notre référence énergétique.



Type de fonction	Fonction minimale de régulation classe C
Régulation de l'émission	Régulation automatique individuelle par pièce au moyen de robinets thermostatiques ou régulateur électronique
Régulation de la température de l'eau du réseau de distribution	Régulation en fonction de la température extérieure
Commande des pompes de distribution	Commande avec régulation à $\Delta P$ constant
Commande du générateur	Régulation en fonction de la température extérieure
Régulation des intermittences pour l'émission et/ou la distribution	Régulation automatique avec optimisation de mise en marche / arrêt
Asservissement entre la régulation du chauffage et du refroidissement pour l'émission et/ou la distribution	Asservissement partiel
Régulation de la génération et ordre de priorité des générateurs	Basée sur les charges
Régulation du débit d'air au niveau des pièces	Régulation programmée
Régulation du débit d'air au niveau de la centrale de traitement d'air	Programmation des heures de mise en marche / arrêt
Rafraîchissement naturel et ventilation nocturne durant le mode refroidissement	Rafraîchissement nocturne
Régulation de la température d'air introduit	Régulation centrale
Régulation de l'humidité	Consigne constante
Commande des stores	Motorisé avec commande automatique
Commande de l'éclairage	Interrupteur manuel et ordre d'extinction

Tableau 8-14 Typologie des fonctions d'une GTB et fonctions minimales d'une classe C d'après [EN15232]

Afin d'illustrer notre stratégie de calcul, nous retiendrons certains résultats de l'étude [EECCAC03], qui nous permettent d'évaluer la combinaison des fonctions minimales requises pour la classe C.

Dans [EECCAC03], les trois fonctions suivantes ne sont pas prises en compte dans l'évaluation du SSEER mais sont définies dans les fonctions minimales de la classe C :

- La régulation de la boucle d'eau en fonction de la température extérieure
- La mise en place de stores motorisés
- L'utilisation d'une régulation du débit d'eau à différentiel de pression constant

D'une manière générale nous proposons d'exprimer l'impact d'une fonction de régulation en utilisant des coefficients corrigeant la consommation et ce pour chaque composant  $i$  de l'installation. Ces coefficients sont notés  $\alpha_i$ . Nous proposons également d'utiliser un coefficient  $\alpha_{th}$  pour prendre en compte la réduction du besoin thermique. Les équations suivantes définissent les relations entre un cas de référence, par exemple ceux de l'étude [EECCAC03], et notre cas spécifique, par exemple en ajoutant la régulation de la boucle d'eau au système de régulation de [EECCAC03].

$$C_i = \alpha_i C_{i ref}$$

$$C_{thermique} = \alpha_{th} C_{thermique ref}$$

Avec  $C_{thermique}$  la consommation énergétique thermique du bâtiment du cas particulier considéré et  $C_i$  la consommation de référence du composant  $i$  du cas particulier considéré.

Pour calculer le  $SSEER_{classe C}$  il nous est nécessaire de déterminer des coefficients  $\alpha_i$  et  $\alpha_{th}$  pour chacune des trois fonctions que nous avons citées auparavant, et de connaître la consommation de référence de chacun des équipements ( $C_{i ref}$ ).

Nous proposons d'examiner l'impact d'une unique correction sur l'efficacité du système dans le paragraphe 8.5.6 pour élaborer une méthode de correction générique. Dans cette partie nous donnons également trois exemples d'application pour les trois fonctions que nous avons précédemment citées (paragraphe 8.5.6.1., 8.5.6.2 et 8.5.6.3). Puis nous évaluons l'impact combiné des deux premières fonctions au paragraphe 8.5.7. Enfin nous évaluons l'impact de la combinaison des trois fonctions

afin d'obtenir l'efficacité du système de classe C au paragraphe 8.5.8. Cette stratégie de calcul est appliquée au paragraphe 8.5.9. Puis nous généralisons cette stratégie pour n'importe quelle répartition de poste énergétique au paragraphe 8.5.10.

#### 8.5.6 Impact générique d'une unique correction sur l'efficacité

Nous rappelons l'expression de l'efficacité saisonnière globale d'une installation de climatisation de référence ( $SSEER_{ref}$ ) (paragraphe 8.2.3)

$$SSEER_{ref} = \frac{C_{thermique\ ref}}{\sum_i C_{ref\ i}}$$

Avec  $C_{thermique\ ref}$  la consommation énergétique thermique du bâtiment de référence et  $C_{ref\ i}$  la consommation de référence du composant  $i$ .

Comme nous l'avons précisé auparavant, la plupart des groupes de production frigorifique installés en France doivent être équipés de compteur électrique. Partant de cette constatation, nous proposons d'exprimer le rendement global en fonction du relevé annuel de la consommation du groupe frigorifique. Pour ce faire nous utiliserons une répartition des autres postes de consommation.

$$C_{ref\ i} = A_{i\ ref} C_{1\ ref}$$

Avec  $A_{i\ ref}$  le coefficient de répartition du composant  $i$  et  $C_{1\ ref}$  la consommation du groupe frigorifique.

Ces coefficients de répartition peuvent être mesurés à l'aide de sous compteurs mais dans notre démarche « par défaut », nous les calculerons à partir d'un benchmark de consommation.

Ainsi le rendement global de l'installation de référence est établi à l'équation suivante.

$$SSEER_{ref} = \frac{SEER_{ref}}{1 + \sum_{i=2}^n A_{i\ ref}}$$

Avec  $SEER_{ref}$  le coefficient de performance saisonnier de la machine de production frigorifique.

De la même manière, nous proposons d'exprimer l'efficacité globale d'une installation de climatisation ayant été corrigée  $m$  fois :

$$SSEER_m = \frac{C_{th\ m}}{\sum_i C_{i\ m}} = \frac{SEER_m}{1 + \sum_{i=2}^n A_{i\ m}}$$

Le rendement global de l'installation corrigé une fois ( $SSEER_1$ ) s'exprime alors :

$$SSEER_0 = \frac{\alpha_{th\ 1} SEER_{ref}}{(\alpha_{1\ 1} + \sum_{i=2}^n \alpha_{i\ 1} A_{i\ ref})}$$

Nous rappelons que nous avons développé au paragraphe 8.3.1 une procédure permettant de quantifier la performance saisonnière de la machine frigorifique de référence ( $SEER_{ref}$ ).

Nous illustrons dans les trois paragraphes suivants l'utilisation de trois corrections appliquées de manière indépendante. Ces corrections permettent d'adapter le  $SSEER_{ref}$  pour obtenir le SSEER d'un système exploité par une régulation de classe C. Le  $SSEER_{ref}$  est obtenu en combinant la valeur par défaut de la procédure du paragraphe 8.3.1 et la répartition des consommations de l'étude [EECCAC03]. Pour plus de clarté, nous remplaçons l'indice  $m$  par le nom de la fonction que nous intégrons dans notre calcul.

#### 8.5.6.1 Correction de l'efficacité pour la régulation de la boucle d'eau

On note tout d'abord que la régulation de la température du réseau en fonction de la température extérieure a uniquement été évaluée pour un système quatre tubes de ventilo-convecteurs. Cette fonction est une action qui ne modifie pas la charge thermique du bâtiment. L'économie d'énergie pour ce type d'amélioration a été évalué dans l'intervalle [1.7% ; 2%] [EECCAC03]. Cette valeur dépend de la localisation du bâtiment. Nous supposons également que la consommation des auxiliaires n'est pas modifiée. Les coefficients correcteurs pour cette fonction sont donc les suivants :

$$\begin{cases} \alpha_{th\ rampe} = 1 \\ \alpha_{1\ rampe} = 0.983 \\ \alpha_{i\ rampe} = 1 \quad \forall i > 1 \end{cases}$$

$$SSEER_{rampe} = \frac{SEER_{ref}}{(\alpha_{1\ rampe} + \sum_{i=2}^n A_{i\ ref})}$$

#### 8.5.6.2 Correction de l'efficacité pour la présence de stores

Une autre fonction n'a pas été prise en compte dans l'étude [EECCAC03]. Cette fonction est celle de la motorisation des stores. Nous négligeons la consommation de la motorisation des stores par rapport à la consommation du groupe frigorifique. Nous supposons que le coefficient saisonnier de la machine frigorifique reste inchangé et que la consommation des auxiliaires (pompe et ventilation de la CTA) l'est également. Cependant, il est possible de prendre en compte un effet interactif de la réduction du besoin pour les ventilateurs des unités intérieures dans le cas où ceux-ci sont contrôlés en fonction de la charge thermique. Ainsi les coefficients correcteurs de cette fonction sont :

$$\begin{cases} \alpha_{th\ stores} = \alpha_{i\ stores} \quad \forall i \neq 3 \\ \alpha_{3\ stores} = 1 \quad (si\ contrôle\ automatique) \end{cases}$$

Avec l'indice  $i = 3$  représente les ventilateurs utilisés pour l'émission terminale.

Alors on a :

$$SSEER_{stores} = \frac{\alpha_{th\ stores} SEER_{ref}}{\left( \alpha_{th\ stores} + \sum_{\substack{i=2 \\ i \neq 3}}^n A_{i\ ref} + \alpha_{th\ stores} A_{3\ ref} \right)}$$

Pour évaluer  $\alpha_{th\ stores}$ , nous proposons d'examiner certains résultats de l'étude [Keepcool10]. Après avoir croisé les informations de l'enveloppe thermique et la typologie de bâtiment, il apparaît que le bâtiment de Type 1c (voir chapitre 6, paragraphe 6.4.2) tend à se rapprocher de celui utilisé dans [EECCAC03]. Nous proposons donc d'utiliser les résultats obtenus dans [Keepcool10] pour prendre en compte la diminution de la charge thermique.

#### 8.5.6.3 Correction de l'efficacité pour la régulation du débit d'eau

Une dernière fonction n'a pas été prise en compte dans l'étude [EECCAC03]. Cette fonction est celle de la régulation du débit d'eau avec une stratégie de différentiel à pression constante. Au chapitre 6, nous avons réalisé un benchmark permettant de quantifier la mise en place de ce système de régulation. Nous proposons donc d'utiliser ces résultats afin de corriger la puissance consommée par les pompes. Par exemple nous avons démontré que l'économie d'énergie, pour une pompe de puissance inférieure à 750 W, était de 20%.

Ainsi les coefficients correcteurs de cette fonction sont :

$$\begin{cases} \alpha_{th\ VV} = 1 \\ \alpha_{i\ VV} = 1 \ \forall i \neq 2 \\ \alpha_{2\ VV} = 0.80 \end{cases}$$

$$SSEER_{VV} = \frac{SEER_{ref}}{(1 + \alpha_{2\ VV} A_{2\ ref} + \sum_{i=3}^n A_{i\ ref})}$$

### 8.5.7 Combinaison de deux corrections indépendantes

Dans le but de déterminer l'efficacité saisonnière du système de climatisation de classe C, nous avons proposé d'utiliser les résultats de l'étude [EECCAC03]. Pour effectuer ce calcul, nous devons combiner les deux corrections précédentes. Nous proposons de calculer cette efficacité corrigée en utilisant successivement notre méthode générique pour les deux corrections précédentes. Dans ce cas il est nécessaire de supposer que l'impact sur la consommation d'une action est indépendant de celui d'une autre action.

Le système de référence à la deuxième correction devient celui obtenu après avoir corrigé l'impact de la régulation de la boucle d'eau. L'efficacité saisonnière du système combinant les deux corrections s'écrit alors :

$$SSEER_2 = \frac{\alpha_{th\ stores} SEER_{rampe}}{\alpha_{th\ stores} + \sum_{i=2}^n A_{i\ rampe} + \alpha_{th\ stores} A_{3\ rampe}}$$

Or

$$\begin{cases} \alpha_{1\ rampe} C_{1\ rampe} = C_{1\ ref} \text{ pour } i = 1 \\ \alpha_{i\ rampe} = 1 \ \forall i > 1 \\ SEER_{rampe} = \frac{Q_{th\ ref}}{\alpha_{1\ rampe} C_{gf\ ref}} = \frac{SEER_{ref}}{\alpha_{1\ rampe}} \end{cases}$$

Donc

$$SSEER_2 = \frac{\alpha_{th\ stores} SEER_{ref}}{\alpha_{1\ stores} \alpha_{1\ rampe} + \sum_{i=2}^n A_{i\ ref} + \alpha_{th\ stores} A_{3\ ref}}$$

On peut écrire cette efficacité saisonnière du système :

$$SSEER_2 = SEER_{ref} \frac{\alpha_{th}}{\alpha_1 + \sum_{i=2}^n A_{i\ ref} + \alpha_{th\ stores} A_{3\ ref}}$$

Avec

$$\begin{cases} \alpha_{th} = \alpha_{th\ stores} \\ \alpha_1 = \alpha_{1\ rampe} \alpha_{th\ stores} \end{cases}$$

Ainsi, l'impact combiné de ces deux fonctions peut s'exprimer simplement à l'aide des coefficients correcteurs précédents.

### 8.5.8 Combinaison des trois corrections indépendantes

Nous combinons dans ce paragraphe les trois fonctions que nous avons définies individuellement aux paragraphes 8.5.6.1, 8.5.6.2 et 8.5.6.3.

Nous réutilisons successivement la même méthode deux fois :

$$SSEER_3 = \frac{SEER_2}{1 + \alpha_{2\ VV} A_{2\ VV} + \sum_{i=3}^n A_{i\ VV}}$$

Donc

$$SSEER_3 = \frac{\alpha_{1\ stores} SEER_{ref}}{\alpha_{th\ stores} \alpha_{1\ rampe} + \alpha_{2\ VV} \alpha_{th\ stores} A_{2\ ref} + \sum_{i=3}^n \alpha_{th\ stores} A_{i\ ref}}$$

La performance  $SSEER_3$  ainsi obtenue est **équivalente** à celle d'un système de climatisation équipé d'un système de régulation de classe C :

$$SSEER_{classe\ C} \approx SSEER_3$$

### 8.5.9 Exemple d'application du calcul du SSEER par défaut pour un système exploité par une GTB de classe C

Dans ce paragraphe, nous illustrons l'application numérique de la procédure d'évaluation du SSEER exploité par une GTB de classe C. Nous proposons d'évaluer cet indicateur de performance pour un système composé d'un groupe de production d'eau glacée refroidi à l'air, d'une centrale de traitement d'air (CTA) et de ventilo-convecteurs (VC).

Pour cela, il est indispensable d'avoir évalué préalablement le SEER du GPEG et de connaître la répartition énergétique des postes électriques. Pour connaître cette répartition, nous proposons d'utiliser la méthode du paragraphe 8.4.1 avec les données de [EECCAC03].

Rappelons les principales hypothèses que nous avons effectuées pour notre procédure de calcul :

- Le SEER d'un groupe de production d'eau glacée reste inchangé lors d'une réduction du besoin thermique de l'installation (hypothèse 1)
- L'impact d'une combinaison d'amélioration est égal à l'impact des améliorations considérées isolément (hypothèse 2)

La répartition énergétique des postes électriques est donnée à la Figure 8-11 (a) pour le climat de Séville ; b) pour le climat de Londres).

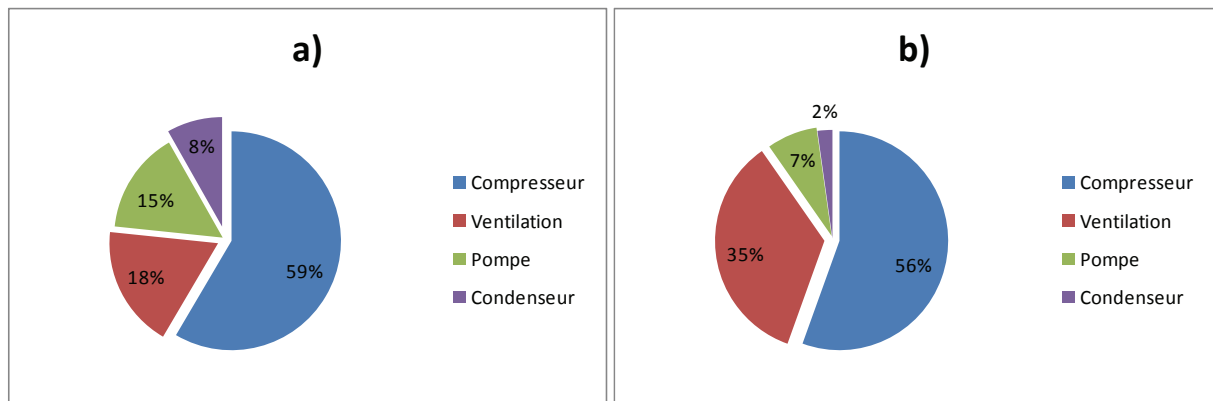


Figure 8-11 Répartition des postes de consommation pour un GPEG à air et une distribution d'eau pour a) Séville b) Londres ; extrait de [EECCAC03]<sup>53</sup>

A partir de cette répartition, nous calculons au Tableau 8-15 les coefficients de répartition de la consommation.

<sup>53</sup> Notons que dans ces figures la consommation « ventilateur » représente la consommation de la CTA ( $\approx 76\%$ ) et la consommation des ventilo-convecteurs ( $\approx 24\%$ ).

	Séville	Londres
Pompe A <sub>2</sub>	0,20	0,12
Ventilation VC A <sub>3</sub>	0,06	0,14
Ventilation CTA A <sub>4</sub>	0,18	0,41
SEER	2,19	1,80
Consommation GPEG kWh/m <sup>2</sup>	52,5	11,6
Consommation thermique kWh/m <sup>2</sup>	115	21
SSEER <sub>ref</sub>	1,52	1,08

Tableau 8-15 Données de référence, d'après [EECCAC03]

Nous exposons au Tableau 8-16 les hypothèses numériques utilisées et le résultat du calcul du  $SSEER_{classe\ C}$  et les économies réalisées.

	Séville	Londres
$\alpha_{th\ stores}$	0,26	0,32
$\alpha_{1\ rampe}$	0,98	0,98
$\alpha_{2\ vv}$	0,80	0,80
<b>SSEER<sub>classe C</sub></b>	<b>1,29</b>	<b>0,79</b>
Economie GPEG kWh/m <sup>2</sup>	38,2	7,9
Economie pompe kWh/m <sup>2</sup>	2,1	0,3
Economie ventilateur VC kWh/m <sup>2</sup>	2,3	1,1
Economie ventilateur CTA kWh/m <sup>2</sup>	0,0	0,0
<b>Economie système kWh/m<sup>2</sup></b>	<b>42,6</b>	<b>9,2</b>

Tableau 8-16 Hypothèses et résultats d'application de la procédure de correction

Après correction, le SSEER est réduit. En effet, nous avons considéré que la réduction de la période d'évaluation était négligeable (hypothèse 3), donc la réduction de la consommation du système de ventilation de la CTA et de la pompe le sont également. Toutefois, comme nous avons considéré un contrôle automatique du débit d'air des ventilo-convecteurs en fonction de la charge thermique, la réduction du besoin a un impact interactif avec la consommation de ces ventilateurs.

Partant de ce résultat, il est également possible d'étudier l'impact d'une GTB d'un niveau de performance supérieur.

#### 8.5.10 Synthèse de la procédure d'évaluation intégrant l'exploitation des équipements

Dans la démarche que nous venons d'effectuer, nous nous sommes appuyés sur les résultats de l'étude [EECCAC03]. Mais cette démarche peut se généraliser pour utiliser d'autres résultats d'étude. En effet, les différentes fonctions utilisées lors d'une étude permettent d'identifier les fonctions manquantes pour atteindre une classe de performance d'une GTB. Ce faisant, il est ensuite possible de corriger de façon adéquate le besoin thermique et les consommations de l'étude utilisée pour évaluer le SSEER d'une classe particulière de GTB existante.

Nous proposons, dans un premier temps, de compléter la procédure que nous avons ébauchée à la Figure 8-10, paragraphe 8.5.1. En effet, à l'aide de cette première procédure nous pouvons calculer l'efficacité de la machine frigorifique quand l'information de la consommation thermique n'est pas disponible. En utilisant une évaluation les coefficients de répartition des différents postes de consommation nous venons de calculer le SSEER d'un système de classe C. La procédure se construit donc selon la figure suivante.

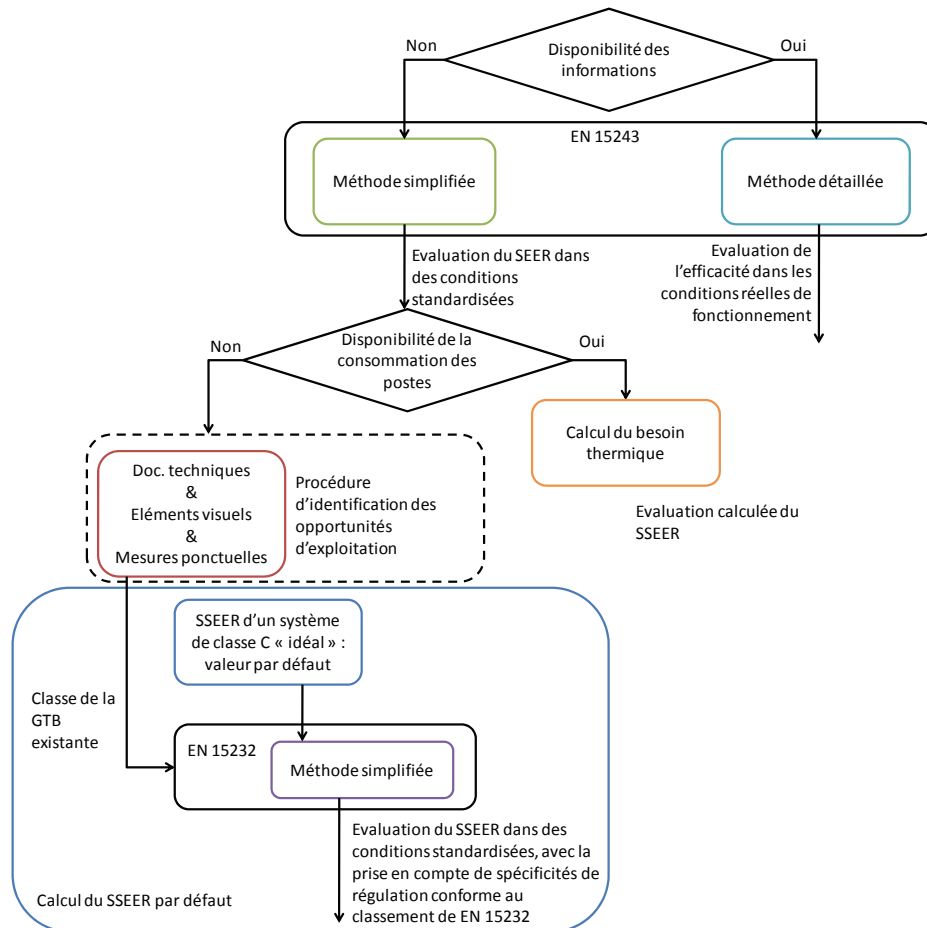


Figure 8-12 Procédure d'évaluation du SSEER et du système de régulation

Dans le cas où le relevé de la consommation électrique de tous les équipements de l'installation est effectué, le besoin thermique peut être évalué à l'aide du SEER de la machine frigorifique. Puis le SSEER peut être directement évalué.

Nous avons ainsi proposé une procédure d'évaluation du SSEER en considérant l'exploitation des équipements. Toutefois, le chemin « par défaut d'information » de cette procédure d'évaluation ne prend pas en compte toutes les spécificités que nous avons soulignées dans la partie 8.4.8. Il est donc nécessaire de développer une procédure de calcul permettant de prendre en compte les spécificités de maintenance, de conception, d'installation et d'exploitation de l'installation de climatisation. Nous nous proposons par conséquent de rendre génériques les corrections d'un système existant.



## 8.6 Développement d'une procédure d'évaluation du SSEER d'une installation existante

Nous avons illustré dans la partie 8.5.8, la possibilité de prendre en compte l'impact du système de régulation sur le SSEER de l'installation en utilisant les classes de performance d'un système de régulation. Pour appliquer cette approche, nous venons de proposer une méthode permettant le calcul du SSEER d'un système de climatisation de classe C par défaut. Mais comme nous l'avons souligné au paragraphe précédent, cette méthode ne prend pas en compte toutes les spécificités d'un système existant. Nous proposons d'élaborer une nouvelle procédure pour considérer ces spécificités.

### 8.6.1 Principe du calcul du SSEER d'une installation existante

La procédure, que nous proposons de développer, utilise principalement trois données d'entrée.

La première de ces données est celle du SEER du GPEG qui peut être calculé en utilisant la procédure de la Figure 8-6 et ce en considérant le **régime de maintenance** du GPEG.

La deuxième de ces données est celle de la consommation du GPEG. Cette consommation peut être celle mesurée in-situ. Par défaut, nous avons proposé de calculer cette consommation en utilisant un benchmark de besoin thermique. La consommation calculée peut ensuite **être corrigée pour prendre en compte le régime de maintenance**.

La troisième de ces données est celle de la répartition des consommations des auxiliaires par rapport au GPEG. Cette répartition peut être évaluée en utilisant les méthodes d'évaluation de chacun des postes des paragraphes 8.4.1 (pour le GPEG), 8.4.4 (pour les pompes de distribution d'eau), 8.4.5 (pour les ventilateurs de distribution d'air), 8.4.6 (pour les émetteurs) et 8.4.7 (pour les tours de refroidissement) et en les corrigeant pour considérer des **spécificités de conception**.

Pour les spécificités de conception, nous avons proposé un ensemble de coefficients correcteurs. Pour les spécificités d'exploitation, nous avons proposé d'utiliser la norme [EN15232] avec laquelle nous calculons globalement l'impact des différentes fonctions de régulation du système. Notons que le benchmark de besoin thermique que nous utilisons n'inclut pas les fonctions de régulation suivantes :

- La régulation de la boucle d'eau en fonction de la température extérieure
- La mise en place de stores motorisés
- L'utilisation d'une régulation du débit d'eau à différentiel de pression constant

Pour les spécificités d'exploitation, nous avons proposé de déterminer le SSEER d'un système équivalent possédant les fonctions d'un système de régulation de classe C, il est donc nécessaire de corriger les différentes consommations en conséquence<sup>54</sup>.

Nous avons synthétisé notre principe de calcul à la figure suivante.

<sup>54</sup> Nous avons illustré la démarche de calcul au paragraphe 8.5.5.



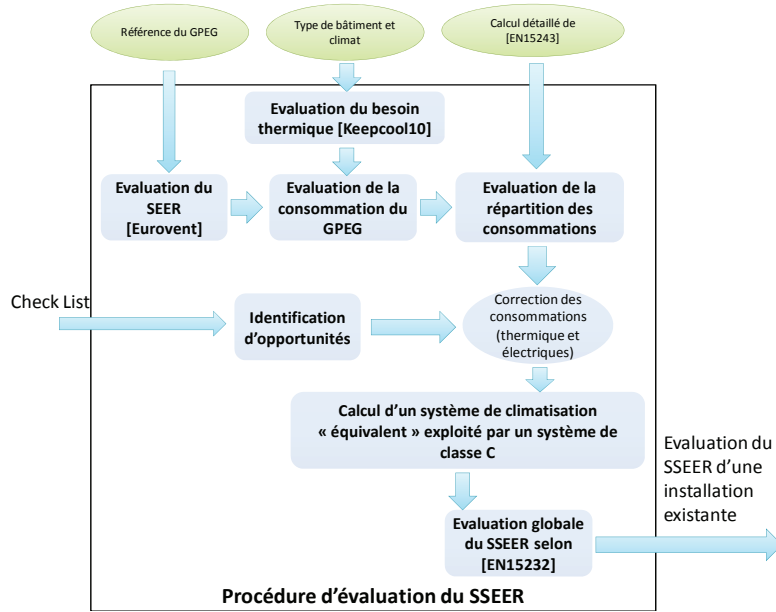


Figure 8-13 Principe de calcul du SSEER par défaut de mesure

### 8.6.2 Combinaison générique de corrections

Quelle que soit la méthode d'évaluation des données d'entrée, nous proposons de généraliser les corrections spécifiques du système existant. Dans notre démarche nous avons retenu, les spécificités suivantes:

- Le régime de maintenance du GPEG
- Les spécificités de conception des composants
- Les spécificités de l'exploitation du système de climatisation

Nous exprimons l'efficacité globale d'une installation de climatisation ayant été corrigée  $m$  fois :

$$SSEER_m = \frac{C_{th\,m}}{\sum_i C_{i\,m}}$$

Nous supposons que les corrections apportées ont un impact indépendant sur la consommation. Ainsi, la consommation d'un composant  $i$  après  $m$  correction s'écrit :

$$C_{i,m} = \alpha_{i,m} C_{i,m-1} = \alpha_{i,m} A_{i,m} C_{1,m-1} = \dots = \prod_{j=1}^m \alpha_{i,j} A_{i,0} C_{1,0}$$

Avec  $C_{1,m}$  la consommation de la machine frigorifique après  $m$  corrections du système.

La consommation thermique après  $m$  corrections s'écrit :

$$C_{th,m} = \alpha_{th,m-1} C_{th,m-1} = \dots = \prod_{j=1}^m \alpha_{th,j} C_{th,0}$$

Donc

$$SSEER_m = \frac{\prod_{j=1}^m \alpha_{th,j} C_{th,0}}{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^m \alpha_{i,j} A_{i,0} C_{1,0}} = SEER_0 \frac{\prod_{j=1}^m \alpha_{th,j}}{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^m \alpha_{i,j} A_{i,0}}$$

Avec  $SEER_0$  l'efficacité saisonnière du groupe frigorifique de référence.

Cette formule permet donc d'estimer rapidement la combinaison de corrections indépendantes impactant la consommation et le besoin thermique du bâtiment.

### 8.6.3 Proposition d'une procédure d'évaluation du SSEER d'une installation existante

Une procédure d'identification des défauts de maintenance et des spécificités techniques de conception de l'installation peut permettre d'évaluer les coefficients  $\alpha_i$  et  $\alpha_{t/h}$  isolément.

Si l'impact énergétique des défauts et améliorations constatés peut se combiner indépendamment<sup>55</sup>, la méthode d'évaluation que nous avons développée au paragraphe précédent peut s'appliquer.

Ainsi lorsque la procédure d'identification a permis d'identifier in-situ les coefficients de corrections, il est nécessaire de corriger les coefficients de répartition des consommations utilisés pour le calcul du SSEER du système de classe C. Nous avons représenté ce cheminement dans la branche basse à droite de la figure suivante.

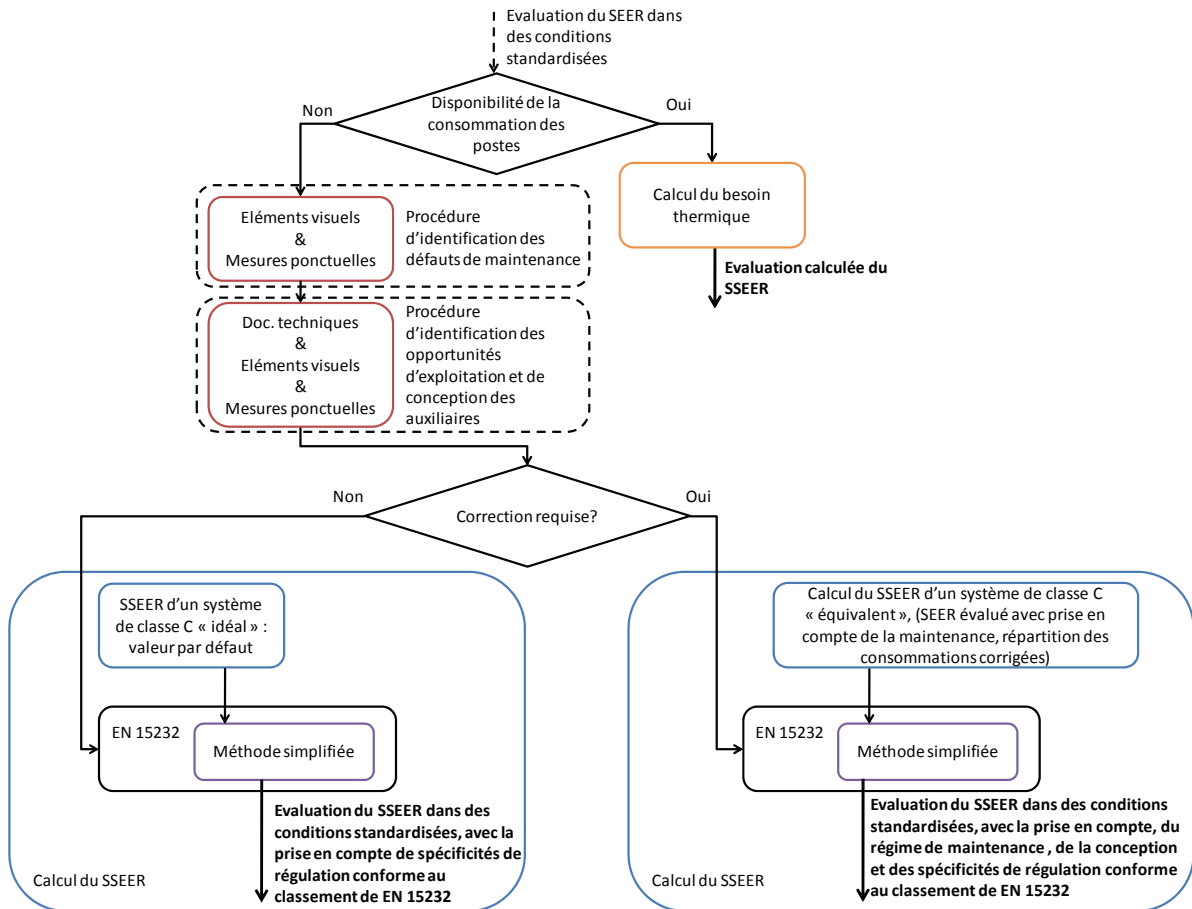


Figure 8-14 Procédure d'évaluation de l'efficacité globale du système de climatisation

Cette procédure permet de quantifier le SSEER d'une installation existante en tenant compte des spécificités de conception et de maintenance d'un GPEG, des spécificités de conception des auxiliaires mais également des spécificités d'exploitation (classe de [EN15232]).

Dans cette partie nous avons explicité certains coefficients correcteurs qu'un inspecteur doit utiliser. Cependant, il reste essentiel d'élaborer une liste de points de contrôle à partir de laquelle l'inspecteur peut identifier, puis évaluer les valeurs des coefficients de correction que nous avons proposées dans notre procédure d'évaluation de la performance globale. Pour combler ces lacunes, nous proposons d'utiliser la liste d'opportunités énergétique que nous avons présentée au chapitre 2.

<sup>55</sup> Nous discutons de cette hypothèse au paragraphe 8.7.7.

## 8.7 Utilisation d'une liste d'opportunités énergétiques pour le développement d'une procédure d'inspection

Dans cette partie, nous cherchons à **inciter le propriétaire et le manager** à approfondir l'étude de certaines options d'amélioration ou de correction de défaut par une **évaluation quantitative de l'impact énergétique** de solutions.

Nous rappelons que la procédure d'inspection est élaborée au sens de la norme [EN15240] :

- Par l'examen de la documentation pertinente relative à la conception du système
- Par des vérifications visuelles des équipements
- Par des vérifications des réglages du système et des paramètres de régulation
- Par des méthodes de mesures optionnelles

Nous proposons de construire une procédure hybride intégrant une sélection de ces éléments afin d'identifier une sélection d'opportunités et de pouvoir fournir des conseils sur le remplacement ou la modification du système de climatisation. C'est-à-dire que nous cherchons à la fois à développer des procédures d'identification et des procédures d'évaluations.

Par conséquent, nous proposons d'employer les procédures développées dans la partie précédente pour évaluer approximativement l'économie résultante de la mise en place d'améliorations. C'est-à-dire que nous cherchons à expliciter les coefficients correcteurs de la procédure du paragraphe 8.6.3.

Nous avons proposé une liste d'opportunités au chapitre 2. Nous rappelons que cette liste est composée de trois familles d'actions relatives aux :

- Améliorations apportées à l'enveloppe du bâtiment et aux charges thermiques
- Améliorations apportées aux équipements
- Améliorations apportées à la maintenance et à l'exploitation

Avant de formuler notre procédure, il est tout d'abord essentiel de présélectionner ces opportunités énergétiques parmi les 137 proposées (cf. annexe 1).

### 8.7.1 Réduction et sélection du nombre de données minimales pour notre procédure d'inspection

Nous avons déjà présélectionné certaines spécificités d'un système existant (voir paragraphe 8.6.2).

Des statistiques permettent également de limiter les informations minimales de la procédure d'identification et d'évaluation des économies d'énergie (voir chapitre 4, paragraphe 4.3.2). Ces statistiques peuvent être de deux types :

- Des statistiques d'identification des opportunités
- Des statistiques permettant de cibler les plus hauts potentiels d'économies d'énergie

A l'aide de la liste d'opportunités du chapitre 2 pour chacune des 137 opportunités existantes, nous avons qualifié pour 38 cas d'études, si la mise en place d'une opportunité particulière était possible (si l'opportunité est déjà présente, elle n'est pas identifiée). Les études de cas utilisées sont situées dans sept zones géographiques européennes distinctes : la France, l'Italie, le Portugal, la Grèce, la Slovénie, l'Autriche, le Royaume Uni et la Belgique. Les bâtiments ont été sélectionnés dans le but de prendre en compte une diversité de systèmes.

Nous avons ainsi effectué une étude statistique sur les opportunités identifiées du projet [Harmonac10] et ce pour 38 cas d'étude. Les résultats sont présentés au Tableau 8-17.

ECO Code	ECO Title	Applicability to CS (Sample 38 CS)
P1.5	Generate the possibility to adopt variable speed control strategy	95%
E4.4	Provide means of reducing electrical peak demand through load shedding	89%
O2.4	Maintain proper system control set points	89%
P4.1	Use the best class of pumps	87%
O2.3	Shut off auxiliaries when not required	84%
O4.7	Increase outdoor air flow rate (direct free cooling)	84%
O4.14	Clean or replace filters regularly	84%
P1.6	Use class 1 electrical motors	79%
P2.6	Replace or upgrade cooling equipment and heat pumps	79%
P2.13	Consider cool storage applications (chilled water, water ice, other phase changing materials)	79%
O2.2	Shut off A/C equipments when not needed	79%
E1.1	Install window film or tinted glass	76%
E4.5	Replace electrical equipment with Energy Star or low consumption types	76%
P1.7	Reduce power consumption of auxiliary equipment	76%
O3.1	Shut chiller plant off when not required	76%
P3.3	Use the best EUROVENT class of fans	74%
O2.5	Adjust internal set point values to external climatic conditions	74%
O4.1	Consider modifying the supply air temperature (all-air and air-and-water systems)	74%
O4.2	Perform night time over ventilation	74%
O4.19	Switch off circulation pumps when not required	74%
P4.5	Install variable volume pumping	71%
E4.7	Modify lighting switches according to daylight contribution to different areas	68%
:	:	:
:	:	:

Tableau 8-17 Classification fréquentielle d'améliorations [Harmonac08]

Ainsi, cette base de données statistique permet de sélectionner prioritairement les améliorations pour élaborer une procédure d'inspection réglementaire.

Dans le mécanisme des certificats d'économie d'énergie, les actions mise en place doivent être déclarées. Il est donc possible d'établir des statistiques de mise en place de ces opérations. Un exemple de statistiques de certificats d'économie d'énergie, représentant 90% des kilowattheures cumac (kWhcumac)<sup>56</sup>, a été publié dans [LCEE10] (voir annexe 7). Même si ces kWhcumac ne reflètent pas exactement les économies d'énergie réalisées pour un projet particulier, ces statistiques peuvent servir de base pour formuler un référentiel d'améliorations pour limiter le nombre de données à récupérer pour notre protocole d'inspection.

Les actions standardisées correspondent, pour la plupart, à une réduction de la consommation de chauffage, cependant certaines opérations sont à souligner (voir les statistiques à l'annexe 7) :

- L'isolation des combles et des toitures
- Le remplacement ou l'installation d'une pompe à chaleur d'un coefficient de performance supérieure à 3.3 [CEEBA10]
- La mise en place de vitrage isolant
- La mise en place de variation électronique de vitesse des moteurs
- L'isolation des murs

<sup>56</sup> L'unité kWhcumac cumule l'énergie sur la durée de vie de l'équipement et l'actualise pour prendre en compte la valeur financière du certificat et la dépréciation technique de la mesure.

- L'utilisation d'éclairage efficace

Ces opérations reflètent une tendance pour l'évolution de la rénovation de l'enveloppe des bâtiments, de la limitation des charges internes et de la sélection de la performance des groupes de production d'eau glacée<sup>57</sup>.

Notre procédure d'inspection, pour identifier les économies d'énergie, doit donc prendre en compte ces deux évolutions pour pouvoir perdurer dans le temps.

Compte tenu des remarques précédentes, les opportunités que nous avons sélectionnées pour un système de climatisation à eau glacée ont été triées en fonction des causes d'inefficacité du chapitre 2, elles sont les suivantes<sup>58</sup> :

i) Dimensionnement d'équipement

- Le dimensionnement d'un groupe de production d'eau glacée (GPEG) et de sa distribution (pompes) (voir Tableau 8-17 ECO P1.5)
- Entre le dimensionnement de la centrale de traitement d'air et du débit d'air hygiénique (voir Tableau 8-17 ECO P3.1)

ii) Sélection d'équipement

- Pour un GPEG (remplacement par un équipement plus efficace) (voir Tableau 8-17 ECO P2.6)
- Pour un ventilateur requis réglementairement (remplacement par un équipement plus efficace) (voir Tableau 8-17 ECO P3.3)
- Pour une pompe (remplacement par un équipement plus efficace) (voir Tableau 8-17, ECO P4.1)

iii) Exploitation

- Pour la mise en place d'un système de pompage à débit variable (voir Tableau 8-17, ECO P4.5)
- Pour maintenir une température de consigne modérée (voir Tableau 8-17, ECO O2.4)
- Pour arrêter les équipements quand leur usage est inutile (voir Tableau 8-17 ECO O2.2, ECO O2.3 et ECO O4.19)

iv) Maintenance de la CTA

- Remplacer les filtres régulièrement (voir Tableau 8-17 ECO O4.14)

v) Maintenance du GPEG

- Maintenir un temps correct du cycle de fonctionnement de la machine frigorifique (voir annexe 2, fiche ECO O3.5).
- Maintenir les températures d'évaporation et de condensation à un niveau correct (voir annexe 2, fiche ECO O3.7).
- Maintenir les débits à un niveau correct (voir annexe 2, fiche ECO 3.12).

<sup>57</sup> Cette sélection se fait indirectement par la sélection de la performance de la machine en chauffage.

<sup>58</sup> Nous avons également pris le soin d'ajouter certaines opportunités communément admises. En effet, il est indéniable que ces statistiques sont directement influencées par les auditeurs.

- Maintenir le fonctionnement du détendeur de la machine frigorifique (voir annexe 2, fiche ECO O3.13).
- Maintenir la charge de fluide frigorigène (voir annexe 2, fiche ECO O3.15).
- Nettoyer les échangeurs côté air ou eau (voir annexe 2, fiche ECO O3.17).

vi) Installation

- Equilibrage du réseau d'eau glacée (voir annexe 1, ECO O4.17)

vii) Maitrise du besoin thermique

- Améliorer l'isolation de la toiture par l'extérieure (voir annexe 7 et annexe 2, fiche ECO E3.1)
- Par l'isolation extérieure des murs (voir annexe 7 et annexe 1, ECO E3.4)
- Installer des protections solaires (voir annexe 2, fiche ECO E1.2)
- Optimiser le contrôle des protections solaires (voir annexe 2, fiche ECO E1.3)
- Utiliser une couleur appropriée pour les façades du bâtiment (voir annexe 2, fiche ECO E4.2)
- Remplacer les équipements électriques par des produits labellisés « Energy Star » ou basse consommation (voir Tableau 8-17 et annexe 2, fiche ECO E4.5)
- Remplacer le système d'éclairage par un système basse consommation (voir Tableau 8-17, annexe 7 et annexe 2, fiche ECO E4.6)
- Par la mise en place de stratégie de ventilation nocturne (voir Tableau 8-17, ECO O4.2)
- Par l'installation d'un système double flux avec récupération de chaleur (voir annexe 1, ECO P3.9)

#### 8.7.2 Amélioration de la maintenance du GPEG : intégration des méthodes de mesures

Comme nous l'avons précisé au paragraphe 8.3.3, afin de juger l'impact de constatations visuelles et la mesure de points de fonctionnement limités, il convient de créer une **procédure d'identification pour identifier la présence de défauts de maintenance**.

De plus nous l'avons indiqué dans la partie 8.1, l'inspecteur peut utiliser **une liste de points de contrôle** en y répondant de façon binaire, un exemple de liste est donné au Tableau 8-1.

Nous proposons d'utiliser le **benchmark** développé dans [Dupont06] à l'aide de [Jacquard04] afin de détecter des améliorations de la maintenance d'une installation frigorifique à l'aide d'une méthode de mesurage. Nous reprenons les mesures à effectuer ponctuellement dans le Tableau 8-18.



Paramètre	Intitulé	Métrologie/Procédure d'obtention
$P_{cond}$	Pression de condensation du fluide frigorigène (bar)	Manomètre installé ou embarqué
$P_{evap}$	Pression d'évaporation du fluide frigorigène (bar)	Manomètre installé ou embarqué
$P_{aspi}$	Pression d'aspiration du compresseur (bar)	Manomètre installé ou embarqué
$P_{refoul}$	Pression de refoulement du compresseur (bar)	Manomètre installé ou embarqué
$T_{cond}$	Température de condensation du fluide frigorigène (°C)	Table/Graduation équivalente sur le manomètre
$T_{evap}$	Température d'évaporation du fluide frigorigène (°C)	Table/Graduation équivalente sur le manomètre
$T_{fsc}$	Température du fluide frigorigène à la sortie de l'évaporateur (°C)	Sonde de contact/Métrologie embarquée
$T_{fsc}$	Température du fluide frigorigène à la sortie du condenseur (°C)	Sonde de contact/Métrologie embarquée
$T_{fsc}$	Température du fluide de refroidissement à l'entrée du condenseur (°C)	Sonde de contact/Sonde embarquée ou installée
$T_{fsc}$	Température du fluide de refroidissement à la sortie du condenseur (°C)	Sonde de contact/Sonde embarquée ou installée
$T_{fsc}$	Température du fluide caloporteur à l'entrée de l'évaporateur (°C)	Sonde de contact/Sonde embarquée ou installée
$T_{fsc}$	Température du fluide caloporteur à la sortie de l'évaporateur (°C)	Sonde de contact/Sonde embarquée ou installée
$t$	Temps effectif de fonctionnement sur une heure (min/h)	Chronomètre/Compteur embarqué ou installé
$n$	Nombre de démarrages sur cette même heure ( $h^{-1}$ )	Comptage manuel, embarqué ou installé
$P_{frigo}$	Puissance frigorifique fournie par le groupe (W)	Métrologie embarquée
$P_{group}$	Puissance électrique absorbée par le groupe (W)	Pince ampère-métrique
$P_{vent}$	Puissance électrique absorbée par chaque ventilateur (W)	Pince ampère-métrique

Tableau 8-18 Méthode de mesure extrait de [Dupont06]

Ces différentes mesures permettent d'établir un ensemble d'indicateurs (Tableau 8-19).

Indicateur	Valeur	Intitulé
$\Delta T1$	$T_{fsc} - T_{cond}$	Sous-refroidissement du fluide frigorigène au condenseur
$\Delta T2$	$T_{fsc} - T_{fsc}$	Différence de température du fluide de refroidissement au condenseur
$\Delta T3a$	$T_{cond} - T_{fsc}$	Différence entre les températures de condensation et du fluide de refroidissement en entrée du condenseur
$\Delta T3b$	$T_{cond} - T_{fsc}$	Différence entre les températures de condensation et du fluide de refroidissement en sortie du condenseur
$\Delta T6$	$T_{fsc} - T_{evap}$	Surchauffe du fluide frigorigène à l'évaporateur
$\Delta T7$	$T_{fsc} - T_{fsc}$	Différence de température du fluide caloporteur à l'évaporateur
$\Delta T8a$	$T_{fsc} - T_{evap}$	Différence entre les températures du fluide caloporteur en entrée de l'évaporateur et d'évaporation
$\Delta T8b$	$T_{fsc} - T_{evap}$	Différence entre les températures du fluide caloporteur en sortie de l'évaporateur et d'évaporation
$\Delta p1$	$P_{evap} - P_{aspi}$	Différence entre les pressions d'évaporation et d'aspiration
$\Delta p2$	$P_{refoul} - P_{cond}$	Différence entre les pressions de refoulement et de condensation
$X_f$	$P_{frigo}/P_{group}$	Taux de charge frigorifique de la machine
$X_e$	$P_{group}/P_{group}$	Taux de charge électrique de la machine
EER	$X_f P_{frigo}/P_{group}$	Energy Efficiency Ratio ponctuel du GPEG
SEER	$E_{frigo}/E_{group}$	Energy Efficiency Ratio saisonnier du GPEG
$t_{cycl}$	$t/n$	Durée moyenne du cycle sur une heure
$t_{eqpc}$	$E_{group}/P_{group}$	Temps de fonctionnement équivalent pleine charge
$P_{group-moy}$	$E_{group}/t$	Puissance moyenne absorbée sur une période longue

Tableau 8-19 Indicateurs à examiner, extrait de [Dupont06]

Ces indicateurs sont des éléments simples à calculer, comme la différence de température ou la différence de pression. Ces indicateurs alors comparés à une base de données (Tableau 8-20).

	Type de condenseur						Évaporatif
	Air	Eau					
		Plaque	Perdue	Recyclée	Recyclée	Recyclée	
				Tour ouverte	Tour fermée	Dry-cooler	
ΔT1	3-5 / 3-5	- / 1-5	3-7 / 3-7	3-7 / 3-7	3-7 / 3-7	3-7 / 3-7	3-7 / 3-7
ΔT2	3-8 / 3-8	-	10-15 / 10-15	5 / 5	5 / 5	5 / 5	-
ΔT3a	12-15 / 12-15	-	-	-	-	-	-
ΔT3b	-	- / 3-5	5 / 5	5 / 5	5 / 5	5 / 5	-
ΔT6	4-6 / 4-7	- / 4-7	4-6 / 4-7	4-6 / 4-7	4-6 / 4-7	4-7 / 4-7	4-6 / 4-7
ΔT7	5 / 4-5	-	5 / 4-5	5 / 4-5	5 / 4-5	5 / 4-5	5 / 4-5
ΔT8a	-	-	-	-	-	-	-
ΔT8b	4-6 / 2-5	- / 2-5	4-6 / 2-5	4-6 / 2-5	4-6 / 2-5	4-6 / 2-5	4-6 / 2-5

Tableau 8-20 Benchmark des indicateurs, extrait de [Dupont06]

Des intervalles de valeurs servent alors de référence pour définir la présence ou non de défauts de maintenance.

Les procédures définies dans [HarmonacECO10], reprennent ainsi les procédures pour identifier une liste d'opportunités énergétiques liées à la maintenance de la machine frigorifique et des tours de refroidissement :

- Maintenir un temps correct du cycle de fonctionnement de la machine frigorifique (voir annexe 2, fiche ECO O3.5).

- Maintenir les températures d'évaporation et de condensation à un niveau correct (voir annexe 2, fiche ECO O3.7).
- Maintenir les débits à un niveau correct (voir annexe 2, fiche ECO 3.12).
- Maintenir le fonctionnement du détendeur de la machine frigorifique (voir annexe 2, fiche ECO O3.13).
- Maintenir la charge de fluide frigorigène (voir annexe 2, fiche ECO O3.15).
- Nettoyer les échangeurs côté air ou eau (voir annexe 2, fiche ECO O3.17).

Les procédures d'identification pour chacune de ces actions ont été synthétisées sous la forme de fiches individuelles [Caillet08] et sont présentées en annexe 2.

Comme nous l'avons proposé au paragraphe 9.3.3, il est possible d'évaluer l'efficacité de la machine frigorifique puis de la corrigée à l'aide d'éléments identifiables sur site, dont nous rappelons les éléments :

- La présence d'incondensable dans le condenseur
- L'encrassement côté air du condenseur
- Le détendeur obstrué
- Un manque d'huile dans le compresseur

Ces éléments sont des causes constatées dans les fiches proposés à l'annexe 2.

Par exemple, la procédure de détection des fuites de frigorigène est explicitée dans la fiche synthétique ECO O3.15 de l'annexe 2, par plusieurs constations visuelles (présence de bulles au voyant liquide, des traces d'huiles sur le carter), une vérification du registre de maintenance (remplissage de fluide frigorigène régulier) et par la mesure de  $\Delta T_6$  et  $\Delta T_1$ .

Nous synthétisons les valeurs que nous proposons de retenir :

	Coefficient correcteur
Encrassement du condenseur côté air	1,05
Présence d'incondensable dans le condenseur	1,05
Compresseur défectueux	1,07
Détendeur obstrué	1,01

Tableau 8-21 Coefficients correcteurs pour la maintenance du GPEG<sup>59</sup>

Une procédure d'inspection de la machine frigorifique a donc été formulée pour fournir des conseils relatifs à l'amélioration de la maintenance mais également établir une estimation calculée de l'efficacité du groupe de production.

### 8.7.3 Intégration de la maintenance de la CTA

La sélection d'un filtre à faible perte de charge peut réduire la consommation du ventilateur de la CTA. Pour obtenir des économies d'énergie il est nécessaire que la centrale soit équipée d'un variateur de vitesse permettant de réduire le débit à la valeur initiale de l'installation (voir annexe 2, fiche ECO 4.14).

<sup>59</sup> Ces valeurs sont issues du travail de [Bory08], nous avons minoré les valeurs de ce travail pour produire ce tableau.



#### 8.7.4 Intégration d'améliorations liées à la sélection des équipements

Des améliorations techniques spécifiques aux systèmes de ventilation et pompage peuvent permettre de réduire de façon significative la puissance nominale des équipements. Ainsi une réduction du frottement mécanique entre le rotor et le stator d'un moteur permet d'améliorer le rendement électrique de celui-ci. De la même manière, une réduction des pertes hydrauliques par une conception aérodynamique optimisée permet d'augmenter le rendement hydraulique du rotor d'une pompe ou d'un ventilateur. Nous avons référencé des benchmarks permettant de classer l'efficacité de ces différents composants de distribution.

Nous les avons synthétisés sous forme de fiches individualisées et présentées dans l'annexe 2. Pour chacune des fiches, l'efficacité du système peut se traduire sous la forme d'un coefficient de performance noté ( $\eta_{eff}$ ). Par exemple pour un GPEG ce coefficient est le SEER, pour une pompe ou un ventilateur ce coefficient représente le rendement total (produit du rendement moteur, du rendement hydraulique/aérodynamique et optionnellement du rendement du variateur de fréquence).

Ces benchmarks peuvent être utilisés pour corriger la répartition de la consommation des composants de l'installation.

En première approximation, l'équation suivante permet de calculer le coefficient  $\alpha_i$  pour chacun de ces composants techniques :

$$\alpha_i = \frac{\eta_{ref}}{\eta_{eff}}$$

Il est nécessaire de connaître les hypothèses effectuées sur l'efficacité ( $\eta_{ref}$ ) de chacun des postes pour l'évaluation de leurs consommations. Les efficacités améliorées ( $\eta_{eff}$ ) sont explicitées:

- Pour un moteur à la Figure 5-11
- Pour une pompe à la Figure 5-16
- Pour un ventilateur à l'annexe 2, fiche ECO P3.3

De la même manière, il est envisageable d'utiliser la classification ou les données du site Eurovent [Eurovent] pour prendre en compte la modification du SEER d'un groupe frigorifique (voir annexe 2, fiche ECO P2.6) dans la procédure du paragraphe 8.3.2.

#### 8.7.5 Améliorations apportées à l'enveloppe du bâtiment et aux charges thermiques

La réduction des charges internes et des améliorations de l'enveloppe peuvent conduire à une diminution de la puissance consommée par le groupe de production. Des conseils relatifs à ces actions peuvent donc être apportés au propriétaire ou au manager du bâtiment inspecté.

Nous proposons d'évaluer l'économie d'énergie de certaines de ces actions « passives » à l'aide des résultats de l'étude [Keepcool10] :

- Installer des protections solaires (voir annexe 2, fiche ECO E1.2)
- Optimiser le contrôle des protections solaires (voir annexe 2, fiche ECO E1.3)
- Améliorer l'isolation de la toiture par l'extérieur (voir annexe 2, fiche ECO E3.1)
- Utiliser une couleur appropriée pour les façades du bâtiment (voir annexe 2, fiche ECO E4.2)
- Remplacer les équipements électriques par des produits labellisés « Energy Star » ou basse consommation (voir annexe 2, fiche ECO E4.5)

- Remplacer le système d'éclairage par un système basse consommation (voir annexe 2, fiche ECO E4.6)

Nous avons synthétisé, sous forme de fiches individualisées, les procédures d'identification de chacune de ces actions. Ces fiches sont présentées en annexe 2.

Les éléments communs, permettant l'identification d'une économie d'énergie relative à l'enveloppe du bâtiment et aux charges thermiques, sont les suivants :

- De reconnaître la typologie de bâtiment en fonction de sa surface vitrée et du nombre d'étages
- De connaître la surface nette et la surface climatisée du bâtiment
- De localiser le bâtiment dans une des cinq zones climatiques

Une évaluation de l'impact sur le besoin thermique de ces opportunités prises individuellement peut être effectuée en supposant que le SEER de la machine frigorifique est inchangée. Nous revenons sur cette hypothèse au paragraphe 8.7.7.

Pour chaque amélioration « passive » ( $j$ ), les coefficients s'écrivent :

$$\begin{cases} \alpha_{thj} \neq 1 \\ \alpha_{1j} = \alpha_{th} \\ \alpha_{ij} = 1 \forall i > 1 \end{cases}$$

L'interaction de la réduction du besoin avec chacune des consommations<sup>60</sup> des postes devrait être examinée pour réduire l'incertitude de l'évaluation des économies d'énergie.

De la même manière, nous proposons d'évaluer l'économie d'énergie de l'action « active »<sup>61</sup> suivante : mise en place d'une stratégie de ventilation mécanique nocturne (voir annexe 2 fiche ECO E2.6)

$$\begin{cases} \alpha_{thj} \neq 1 \text{ cf. [Keepcool10]} \\ \alpha_{GPEGj} = \alpha_{th} \\ \alpha_{ventilateur} \approx 2 \text{ cf. [Keepcool10]} \\ \alpha_{ij} = 1 \forall i > 1 \end{cases}$$

L'interaction de la réduction du besoin avec chacune des consommations des postes devrait être examinée pour réduire l'incertitude de l'évaluation des économies d'énergie.

#### 8.7.6 Améliorations apportées à l'exploitation : intégration de la vérification des points de vérification des paramètres de régulation

Au chapitre 6, nous avons explicité un benchmark pour l'exploitation à débit variable du réseau d'eau glacée qui dépend de la puissance à l'arbre du moteur et du type de régulation envisagé.

En nous appuyant sur les travaux de [Grignon10] nous définissons une réduction du besoin thermique de 10%/°C lorsqu'il est envisageable de maintenir une température de consigne modérée (voir annexe 1, ECO O2.4). Physiquement cette action constitue une réduction des charges thermiques.

Nous n'avons pas développé de coefficient par défaut pour estimer l'arrêt du GPEG qui fonctionne inutilement (voir annexe 2, ECO O2.3, ECO O3.1) en période d'inoccupation. Cependant notons qu'un cycle de mise en température du bâtiment peut être nécessaire, ce qui diminue les économies d'énergie.

<sup>60</sup> En particulier l'économie d'énergie des ventilo-convecteurs.

<sup>61</sup> A titre d'exemple, le stockage de froid en dehors des heures de climatisation, ou l'arrêt à distance des équipements avec le contrôle des réseaux « intelligents » sont des actions actives.

### 8.7.7 Pertinence de la procédure proposée

Les trois hypothèses que nous avons effectuées lors de notre procédure d'évaluation sont les suivantes :

- L'impact d'actions portant sur la sélection d'équipements performants a un impact négligeable sur l'évaluation des économies d'énergie (hypothèse 1)
- L'impact d'une combinaison d'améliorations est égal à l'impact des améliorations considérées isolément (hypothèse 2)
- La consommation des différents postes électriques est constante pour une réduction passive des besoins thermiques (hypothèse 3)

#### 8.7.7.1 Effets interactifs des actions d'amélioration portant sur une réduction passives des charges thermiques : hypothèse 3

Les effets interactifs de la réduction passive du besoin thermique sur les différents postes de consommation doit être examinés pour vérifier si la consommation électrique totale est invariante. Mais, pour examiner l'erreur introduite par cette hypothèse il est également indispensable de connaître la répartition des consommations.

Lors d'une réduction des besoins thermiques, le GPEG devient surdimensionné. Il est donc nécessaire d'examiner l'impact du surdimensionnement sur le SEER pour vérifier si l'on peut supposer que la répartition des postes de consommation est constante.

Nous nous attachons à décrire uniquement l'impact interactif sur la consommation du groupe.

En supposant qu'une réduction du besoin thermique entraîne un surdimensionnement de la puissance frigorifique du groupe au maximum égale à la réduction de ce même besoin<sup>62</sup>, il est possible de calculer l'impact de la réduction du besoin thermique sur le SEER.

L'impact d'un surdimensionnement de 30% sur le SEER du GPEG est limité [Riviere04] (Tableau 8-22 et Tableau 8-23)<sup>63</sup>.

Londres-DAC	n°5	n°7	n°8	n°9	n°2
<b>Surdimensionnement 0 %</b>	2.94	4.07	2.94	3.22	2.93
<b>Surdimensionnement 30 %</b>	2.77	3.96	2.79	3.00	2.62
<b>Ecart 30 % / 0 %</b>	-6%	-3%	-5%	-7%	-10%
<b>Surdimensionnement 60 %</b>	2.63	3.83	2.66	2.82	2.40
<b>Ecart 60 % / 0 %</b>	-11%	-6%	-10%	-12%	-18%

Tableau 8-22 Impact du surdimensionnement sur le SEER, pour un système à débit d'air constant, climat de Londres, extrait de [Riviere04]

Séville-DAC-FC	n°5	n°7	n°8	n°9	n°2
<b>Surdimensionnement 0 %</b>	2.61	3.27	2.72	2.98	3.06
<b>Surdimensionnement 30 %</b>	2.53	3.30	2.65	2.90	2.77
<b>Ecart 30 % / 0 %</b>	-3%	1%	-3%	-3%	-9%
<b>Surdimensionnement 60 %</b>	2.43	3.26	2.58	2.74	2.53
<b>Ecart 60 % / 0 %</b>	-7%	0%	-5%	-8%	-17%

Tableau 8-23 Impact du surdimensionnement sur le SEER, pour un système à débit d'air constant, climat de Lisbonne, extrait de [Riviere04]

La surconsommation d'un GPEG surdimensionné à 30% est faible. L'effet interactif de la réduction d'un besoin de 30% sur la consommation du groupe est donc négligeable.

<sup>62</sup>  $K \leq \frac{\Delta C_{th}}{C_{th,ref}}$  avec  $K$  le coefficient de surdimensionnement du GPEG

<sup>63</sup> La nomenclature des GPEG est la même que celle de la page 68.

Cependant lorsque le surdimensionnement dépasse 60%, pour les compresseurs à bi-vis à deux circuits et deux étages de puissance, il peut être envisageable de prendre en compte l'impact de l'augmentation de la consommation (17% pour ce type de GPEG).

Nous n'avons pas d'éléments complémentaires pour justifier les effets interactifs de la réduction de besoin des autres postes énergétique (en particulier pour les unités terminales de type ventilo-convecteur<sup>64</sup>).

#### 8.7.7.2 Effets interactifs des actions d'amélioration de conception : hypothèse 2

L'amélioration de l'efficacité hydraulique et aéraulique entraîne une réduction des besoins thermiques de climatisation. En effet la chaleur dégagée par les pertes hydrauliques et aérauliques des parties mobiles sont réduites<sup>65</sup>.

Pour le système de ventilation, la puissance thermique échangée correspond, dans la plupart des cas, aux pertes du moteur et aux pertes aérauliques. Pour estimer ces pertes, il est nécessaire d'estimer la puissance électrique du système de ventilation et son rendement. Nous proposons de retenir un coefficient d'efficacité spécifique du système de ventilation de 0.7 Wh/m<sup>3</sup>.

En supposant un débit de 25 m<sup>3</sup>/h/occupant, nous avons estimé la puissance la puissance électrique du système de ventilation. En supposant un rendement de 0.5<sup>66</sup> pour le groupe moto-ventilateur, nous avons estimé la puissance échangée au réseau aéraulique. En supposant un gain de 10% d'efficacité globale pour le moto-ventilateur, nous avons également estimé le gain de puissance thermique associé (Tableau 8-24).

	Puissance électrique du système de ventilation kW	Puissance échangée par le moto-ventilateur kW	Economie de puissance thermique kW
Type 3	1,5	0,7	0,1
Type 2	7,3	3,6	0,4
Type 1	21,9	10,9	1,1

Tableau 8-24 Gain thermique du système de ventilation sur le réseau aéraulique

La puissance thermique échangée par le système de ventilation représente environ 1% à 2% de la charge thermique maximale du bâtiment (voir Tableau 8-6). De plus, en supposant que le besoin thermique du bâtiment est dû à la charge thermique de ventilation<sup>67</sup>, la part provenant du transfert de chaleur du ventilateur représenterait moins de 1% de la consommation thermique annuelle. Un changement de technologie du système de ventilation a donc un impact négligeable sur la réduction du besoin thermique pour un système à débit d'air constant.

<sup>64</sup> La consommation des auxiliaires terminaux de ventilation est directement proportionnelle au besoin thermique de l'installation dans [EN15243], ce qui est à exclure dans le cas d'une réduction des besoins.

<sup>65</sup> Les pertes mécaniques et électromagnétiques du moteur d'entraînement de la pompe ou du ventilateur peuvent également être réduites. Pour un ventilateur dont le moteur est placé à l'intérieur du réseau, ce qui est la plupart du temps le cas, la réduction du besoin thermique est la même que celle du gain de consommation électrique.

<sup>66</sup> Le rendement et l'efficacité spécifique sont liés par le différentiel de pression du réseau.

<sup>67</sup> Ce qui est une hypothèse de calcul pour obtenir un ordre de grandeur : pour le climat Londonien et un système à débit constant, le besoin thermique provient minoritairement de la charge de l'air introduite dans le bâtiment (0.04% de la charge thermique totale) [EECCAC03] ; le besoin thermique, pour un système à débit constant et pour le climat de Séville, représente environ 20% du besoin thermique total [EECCAC03]

Nous avons calculé la puissance thermique échangée au réseau d'eau glacée provenant des pertes hydrauliques de la pompe<sup>68</sup> (Tableau 8-25).

	Puissance thermique de la pompe échangée au réseau kW
Type 3	0,0424
Type 2	0,2452
Type 1c	1,8272
Type 1b	1,2384
Type 1a	1,5208

Tableau 8-25 Gain thermique de la pompe sur le réseau d'eau glacée

Approximativement, un facteur dix existe entre la puissance thermique échangée sur le réseau hydraulique et aéraulique. Le gain de besoin thermique que l'on peut escompter pour une pompe est donc très faible lorsque la charge thermique est non nulle.

Par ailleurs, il serait intéressant d'intégrer la puissance thermique échangée par la pompe<sup>69</sup> pour évaluer les pertes énergétiques du fonctionnement du GPEG lorsque la charge thermique est non nulle et en particulier lorsque le bâtiment est inoccupé. En effet, plusieurs études de cas de [Harmonac10] ont montré un fort potentiel d'économies d'énergie pour cette programmation (jusqu'à 2.34 kWh/(m².an) pour l'arrêt du GPEG et de la pompe du réseau). La mise au point d'un benchmark pour cette stratégie permettrait de compléter la liste d'opportunités que nous avons sélectionnées.

C'est pourquoi, pour les actions portant sur la sélection de l'efficacité de composants techniques (en particulier l'efficacité hydraulique / aéraulique des pompes / ventilateurs et la concordance du point de fonctionnement nominal avec le point de meilleur efficacité), pour notre première approximation des économies d'énergie, il est possible de négliger la réduction des besoins thermiques.

De la même manière, pour les actions portant sur l'équilibrage du réseau hydraulique / aéraulique, en première approximation, il est possible de négliger la réduction des besoins thermiques.

Ce type d'actions peut être évalué de manière indépendante.

#### 8.7.8 Effets interactifs des actions d'exploitation

Pour une amélioration de l'exploitation des équipements il est essentiel de comprendre les effets indirects que celles-ci peuvent avoir sur le reste du système. Par exemple au paragraphe 8.4.6 nous avons noté que l'augmentation du réseau d'eau de 8°C avait pour conséquence une augmentation de 75% de la consommation des ventilo-convecteurs.

Cependant, pour les opportunités que nous avons retenues, une seule fonction doit être examinée plus en détail : le changement de la température de consigne. En effet cette opportunité tend à surdimensionner le groupe de production d'eau glacée. Mais comme nous l'avons décrit au paragraphe 8.7.7.1, en première approximation de cet impact est limité.

<sup>68</sup> En supposant que cette puissance correspond à 40% de la puissance hydraulique nominale, ce qui correspond à une pompe d'efficacité hydraulique situé entre celle d'une pompe d'efficacité moyenne et celle d'efficacité faible (voir Figure 5-16)

<sup>69</sup> Les pertes thermiques du réseau devraient également être intégrées dans ce même calcul.

### 8.7.8.1 Effets interactifs des actions d'amélioration portant sur une réduction des charges thermiques

Nous nous sommes appuyés sur les résultats de l'étude [Keepcool10] pour examiner l'impact combiné des principales améliorations influençant le besoin thermique d'un bâtiment. Ces ensembles d'amélioration sont les suivants :

- Ensemble 1 : la mise en place d'équipements de bureautique efficaces et d'un système d'éclairage efficace
- Ensemble 2 : ensemble 1 en ajoutant des protections solaires vénitiennes contrôlées avec la radiation solaire
- Ensemble 3 : ensemble 2 en ajoutant un rafraichissement naturel nocturne et diurne
- Ensemble 4 : ensemble 3 en ajoutant des fenêtres efficaces

Nous proposons de comparer les résultats de cette étude avec notre proposition de calcul. C'est-à-dire que nous souhaitons calculer l'impact sur le besoin thermique de chacune des améliorations prise isolément puis utiliser la procédure de calcul proposée au paragraphe 8.6.2. Nous comptons ainsi vérifier que les effets des améliorations peuvent être considérés de façon indépendante puis être combinés.

Nous avons synthétisé les résultats de notre exercice à la Figure 8-15.

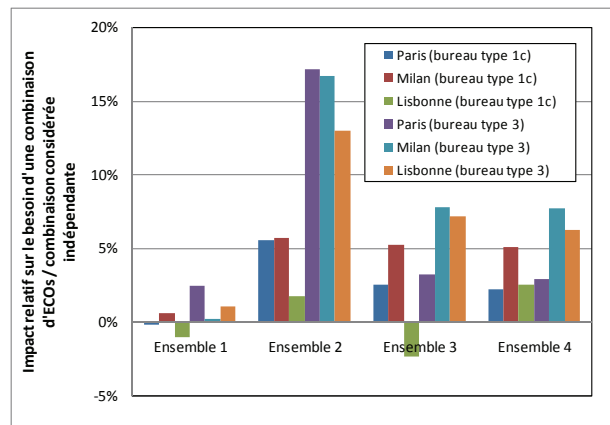


Figure 8-15 Erreur relative pour une utilisation indépendante des améliorations pour les bâtiments existants non rénovés, calculée d'après [Keepcool10]

Pour les bâtiments de type 1, l'impact interactif est limité quel que soit l'ensemble d'amélioration et le climat.

Cependant pour les bâtiments de type de 2, l'impact interactif est important pour l'ensemble d'amélioration n°2. Notons cependant que cet écart est positif. Donc l'application de notre procédure de calcul sous estime de façon significative l'économie d'énergie en ne prenant pas en compte les effets interactifs entre les améliorations.

Nous avons noté au paragraphe 8.7.1 qu'il existe un mécanisme incitatif qui permet de développer principalement les investissements en faveur de la rénovation de l'enveloppe du bâtiment.

L'étude que nous venons d'effectuer pour l'enveloppe représentative du parc actuel peut également être appliquée en vue de l'évolution future de l'enveloppe des bâtiments. En effet le parc actuel estimé dans l'étude précédente, correspond à celui du parc existant avant la réglementation thermique qui est aujourd'hui en vigueur [RT2005]. Il est donc nécessaire d'étudier si notre procédure de calcul s'applique également pour des



bâtiments qui viennent d'être construits ou rénovés<sup>70</sup>. Nous appuyons notre étude à l'aide des résultats de [Grignon10] pour deux climats français (Nice et Trappe)<sup>71</sup> et une pièce de bureau orientée sud-ouest d'un bâtiment de type 2. Nous avons considéré cinq ensembles d'amélioration, ils sont les suivants :

- Ensemble 1 : la mise en place d'un système d'éclairage efficace et de protections solaires pilotées en fonction du rayonnement solaire
- Ensemble 2 : la mise en place d'un système d'éclairage efficace et de vitrages à faible facteur solaire
- Ensemble 3 : ensemble 1 en ajoutant des vitrages à faible facteur solaire
- Ensemble 4 : ensemble 3 en ajoutant une ventilation mécanique nocturne
- Ensemble 5 : ensemble 4 en ajoutant une ventilation naturelle diurne et nocturne

Nous avons synthétisé les résultats de notre exercice à la Figure 8-16 pour des bâtiments non rénovés avant 2005 et des bâtiments rénovés selon les critères de [RT2005].

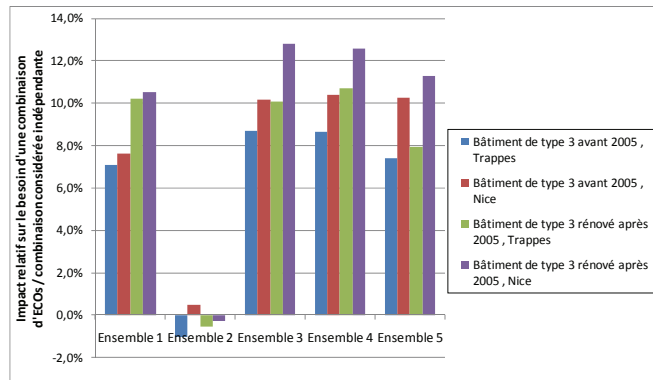


Figure 8-16 Erreur relative pour une utilisation indépendante des améliorations pour un bâtiment de type 2, calculée d'après [Grignon10]

L'évolution de la réglementation thermique en faveur de la réduction des besoins de chauffage a une incidence significative sur le calcul que nous avons proposé. En effet, pour chacun des climats étudiés, l'erreur augmente quel que soit l'ensemble de solution considéré (sauf pour l'ensemble 2). Mais comme nous l'avons souligné auparavant, lorsque l'erreur est significative, l'écart est positif. Donc les économies d'énergie sont sous-estimées.

<sup>70</sup> Les bâtiments d'une SHON supérieure à 1000 m<sup>2</sup> dont le coût des travaux de rénovation est supérieur à 25% du coût de la construction sont soumis à [RT2005].

<sup>71</sup> Le climat de Paris correspond approximativement à celui de Trappes, le climat de Nice à celui de Lisbonne selon le découpage géographique de [Keepcool10].

## 8.8 Synthèse de la procédure d'inspection réglementaire proposée

La DPEB [DPEB02] impose une évaluation de la performance et doit permettre de conseiller le propriétaire sur des pistes d'améliorations possibles.

Nous avons proposé d'améliorer d'une part l'évaluation qualitative de l'efficacité et d'autre part d'améliorer la qualité des conclusions obtenues en introduisant une procédure d'évaluation quantitative.

Pour réussir à quantifier avec précision la performance d'une installation de nombreuses informations techniques et mesures sont nécessaires.

Afin de primer les investissements réalisés en faveur du suivi énergétique d'une installation, nous avons alors proposé une méthode d'évaluation permettant de fournir des valeurs d'efficacité, ajustables en fonction des technologies utilisées, pour les propriétaires ne possédant pas l'information suffisante pour mesurer la performance. Notre démarche permet ainsi à un inspecteur d'évaluer la performance du GPEG et la plupart des consommations des auxiliaires, et ce malgré l'absence de données.

D'autre part, nous nous sommes basés sur cette méthode de calcul pour réussir à évaluer des opportunités énergétiques que nous avons préalablement sélectionnées.

Nous avons créé un lien entre la liste de point de contrôle existante et les améliorations et défauts d'une installation.

A défaut d'informations mesurées, l'inspecteur peut juger à partir d'informations simples (documents, constatations visuelles, mesures intégrées de la machine frigorifique) la **maintenance**, la **conception**, l'**installation**, l'**exploitation** et l'**enveloppe** pour obtenir des **coefficients de correction**. Ces coefficients permettent d'**ajuster** à la fois la **performance globale** du système de climatisation mais également d'évaluer rapidement la consommation.

De plus, nous nous sommes attachés à vérifier que l'application de notre méthode de calcul pouvait être également utilisée en première approximation pour le parc de bâtiments neufs.

Les deux méthodes d'évaluation que nous avons proposées pourraient être utilisées dans le cadre de la future transposition de [DPEBrecast10].



# Conclusions

Dans ce travail, nous nous sommes attachés à analyser un système fonctionnel permettant d'assurer le confort des occupants.

Comme tout autre système énergétique, il peut être décomposé en un ensemble de fonctions élémentaires qui convertissent une énergie secondaire en énergie utile puis en service énergétique. Pour les fonctions élémentaires considérées ici, cette énergie utile peut être une énergie mécanique ou thermique. Mais cette conversion n'est pas parfaite.

De nombreuses pertes thermiques et mécaniques réduisent intrinsèquement l'efficacité de chacune de ces fonctions. Le comportement et les décisions humaines viennent également perturber la fonction du système tout au long de son cycle de vie.

Un service énergétique privé ou public doit pouvoir évaluer tous ces facteurs pour proposer des solutions adaptées aux nombreuses spécificités d'un bâtiment et d'un système existant. Pour inciter à l'investissement en faveur de l'efficacité énergétique, ces services doivent pouvoir identifier et évaluer efficacement des pistes de solutions. Par conséquent, l'analyse des différents phénomènes physiques et humains est essentielle pour comprendre les interactions entre l'efficacité du système et les différentes fonctions élémentaires. C'est pourquoi, nous avons explicité les différentes fonctions élémentaires en regard avec les différentes étapes du cycle de vie d'une installation.

Mais les moyens humains et techniques à mettre en œuvre pour réaliser ce service peuvent s'avérer rapidement coûteux. Dans le but de développer les services de ces sociétés qui les mettent en œuvre, il est alors essentiel de proposer des méthodes permettant de minimiser ce coût et ce tout en maîtrisant l'analyse de ces solutions. C'est dans ce contexte, que notre travail permet de formaliser un ensemble de méthodologies pour aider au développement de ces services. Ce développement peut être structurel mais il peut également permettre de faire évaluer la définition de l'offre du service procuré au client.

Notre travail peut servir d'exemple pour formaliser de procédures structurées associées à divers coûts. Ce coût peut être adapté en fonction des économies d'énergie escomptées du projet et de l'étape d'avancement du service. Comme nous l'avons illustré pour l'exploitation à débit variable d'une pompe, cette estimation des économies d'énergie peut être liée à des mètres carrés de surface climatisée mais pour d'autres améliorations il peut en être tout autrement. Chacune des sociétés d'exploitation, recherchant une amélioration particulière, doit alors intégrer le potentiel d'économie d'énergie pour chacune des étapes de son service.

Nos méthodologies peuvent également s'appliquer pour développer de nouvelles solutions. Nous nous sommes ainsi attachés à utiliser une partie de nos méthodologies pour développer des stratégies d'exploitation innovantes. Mais pour l'une d'entre elles nous avons souligné la nécessité de formaliser des critères de confort particuliers. Le contexte actuel de développement de nouvelles stratégies d'exploitation (par exemple l'arrêt ou la mise en marche des équipements à distance) devrait favoriser la définition de nouveaux critères de confort si les définitions des contrôles prennent en compte la possibilité d'une interaction de l'occupant avec l'environnement intérieur et extérieur.

Notre analyse a également démontré qu'un service énergétique comporte plusieurs étapes dont les moyens mis en œuvre peuvent varier de manière importante. La première étape reste par conséquent primordiale pour la chaîne humaine et technique qui intervient sur un projet. En effet elle conditionne toutes les étapes entreprises pour pérenniser le succès des différents projets.

Nous avons illustré cet aspect à travers le mécanisme d'inspection réglementaire des installations de climatisation. L'inspection, à son stade actuel de transposition, porte principalement sur la maintenance de l'installation. Cette stratégie limite drastiquement le potentiel d'économies d'énergie et donc limite également les investissements en faveur de l'efficacité énergétique.

Par conséquent, nous avons cherché à étendre sa portée pour inclure les différents facteurs impactant l'efficacité de la conversion énergétique. Nous avons alors utilisé nos méthodologies pour aider le développement du mécanisme d'inspection réglementaire.

Notre analyse nous a amené à proposer une procédure plus complète portant sur une sélection de solutions parmi les fonctions élémentaires et pour les différentes étapes du cycle de vie des composants techniques.

Notre proposition reste un exemple pour construire un outil d'analyse préliminaire pour les installations existantes. Les référentiels utilisés dans notre démarche sont donc ceux qui correspondent aux différentes spécificités représentatives des bâtiments et systèmes existants. Ces référentiels pourraient être adaptés aux nouvelles problématiques des bureaux d'étude, des sociétés d'exploitation, des sociétés de maintenance. En effet notre méthodologie leur permettrait de développer de nouveaux référentiels de solutions techniques novatrices comme nous l'avons illustré à travers le contrôle adaptatif de l'ambiance.

# Références

- [Ademe09] Diagnostic énergétique dans les bâtiments cahier des charges, guides et cahiers techniques, ADEME, 2009
- [Ahn01] Model-Based Fault Detection and Diagnosis for Cooling Towers, Ahn B. C. et al, ASHRAE Transaction 2001
- [Airwell] Notice technique des centrales compactes de traitement d'air Airwell modèles Wespack 1.39, 2.69 et 3.99
- [Algh01] Why Did I Buy Such an Oversized Pump?, Ahlgren R.C.E, ASHRAE Transactions 2001
- [AIEAnnex11] Source Book for Energy Auditors, Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme, Annex 11, International Energy Agency, 1987, édité par M.D. Lyberg.
- [AIEAnnex48] Analysis of Building Heating and Cooling Demands in the Purpose of Assessing the Reversibility and Heat Recovery Potentials P.Stabat et al, IEA ECBCS Annex 48, [www.ecbcs-48.org](http://www.ecbcs-48.org) November 2009.
- [ASHRAEA07] ASHRAE Handbook Application, 2007, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
- [ASHRAEF97] ASHRAE Handbook Fundamentals, 1997, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
- [ASHRAEG02] ASHRAE Guideline 14-2002, Measurement of Energy and Demand Savings, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
- [ASHRAES04] ASHRAE Handbook Systems and Equipment, 2004, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
- [Ballarini09] Application of energy rating methods to the existing building stock: Analysis of some residential buildings in Turin, Ilaria Ballarini , Vincenzo Corrado, Energy and Buildings 41 (2009) 790–800
- [Bertagnolio08] Building and HVAC System Simulation with the Help of an Equation Solver, Stéphane Bertagnolio, Gabrielle Masy, Jean Lebrun, Philippe André; 3rd National Conference of IBPSA-USA on building simulation (SIMBUILD 2008), July 30 – August 1, 2008, Berkeley, California, USA.
- [Bory08] Analyse et simulation de défauts des équipements de climatisation en vue d'un audit énergétique, Bory, thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2008
- [BouteloupD98] Climatisation conditionnement d'air, Distribution des fluides, Bouteloup et al, 1998
- [BouteloupS98] Climatisation conditionnement d'air, Les systèmes, Bouteloup et al, 1998
- [Boutin09] Article 119 de la Loi n° 2009-323 du 25 mars 2009 (Loi Boutin) portant sur la mobilisation pour le logement et la lutte contre l'exclusion, publiée au Journal Officiel de la République Française n°0073 du 27 mars 2009 page 5408, NOR: LOGX0815554L
- [Breuker99] Common Faults and Their Impacts for Rooftop Air Conditioners, M.S. Breuker, J.E. Braun, ASHRAE Winter Meeting 1999.
- [BSRI03] A BRSIA Guide – Rules of Thumb – Guidelines for Building Services, K. Pennycook, UK 4th edition, The Cameleon Press Ltd, 2003.

- [Cacialo08] Effet de différentes solutions techniques sur les températures de non-chauffage et de non-refroidissement et sur le potentiel de free cooling dans les bâtiments de bureaux, conférence IBPSA France 2008, 2008.
- [Caillet08] A proposal for the field identification of a short list of Energy Conservation Opportunities related with Air Conditioning equipments, conférence IEECB'08, Francfort, Allemagne 2008
- [Caillet09] Simulation of Control Options for HVAC Management of a Typical Office Building, conférence Climamed'09, Lisbonne, Portugal, 2009
- [Caillet10] Procedures to identify Energy Conservation Opportunities applied to HVAC system: example of VSD of chilled water pumps, conférence Clima 2010, Antalya, Turquie, 2010.
- [Carrier] Notice technique Carrier d'un groupe de production d'eau glacée
- [CARRIER09] Notice technique du module de régulation Pro-Dialog Plus, Carrier.
- [CEEBAT10] Certificats d'économies d'énergie, Opération n°BAT-TH-14-GT, Installation d'une pompe à chaleur air-eau, disponible sur <http://www.developpement-durable.gouv.fr/energie>
- [Certif09] Présentation du mécanisme de certificat blanc, site internet du gouvernement Français, <http://www.developpement-durable.gouv.fr/energie>
- [CFPavril09] Chaud Froid Plomberie n°722 Avril 2009.
- [Chan80] Simulation-Based Load Synthesis Methodology For Evaluating Load Management Programm, Chan et al, IEEE Summer Meeting, Paper # 80SM-585-0
- [Chen01] Simple Rule-Based Methods for Fault Detection and Diagnostics Applied to Packaged Air Conditioners, B. Chen, J.E. Braun, ASHRAE Transaction 2001.
- [Chung06] Benchmarking the energy efficiency of commercial building, Applied Energy 83 (2006), 1-14, William Chung, Y.V. Hui, Y Miu Lam
- [Chung09] A study of energy efficiency of private office buildings in Hong Kong, William Chung, Y.V. Hui, Energy and Buildings 41, 2009, 696-701
- [CIAT1] Note technique CIAT ; Installation, fonctionnement, mise en service, maintenance pour le modèle Aurea 2.
- [CIAT2] Notice technique CIAT d'une centrale de traitement d'air
- [CIAT3] Notice technique CIAT d'un groupe de production d'eau glacée
- [CodeTravail] Code du travail, Article R232-5-3, Abrogé par Décret n°2008-244 du 7 mars 2008 - art. 9 (V)
- [Com02] The Sensitivity of Chiller Performance to Common Faults, Comstock M.C. et al, ASHRAE Transaction 2002
- [Consoclim] Outil d'estimation utilisant les méthodes de calcul des consommations des bâtiments climatisés de CONSOCLIM, Morisot et al., 1999
- [Corgnati08] A method for heating consumption assessment in existing, buildings: A field survey concerning 120 Italian schools Stefano Paolo Corgnati, Vincenzo Corrado, Marco Filippi, Energy and Buildings 40 (2008) 801–809
- [Cyssau95] Manuel de la régulation et de la gestion technique, Cyssau, PYC Edition, 1995
- [DOE] Outil d'évaluation DOE-2 LBL, DOE-2 reference manual, version 2.1A, LBL-8706, rev. 2, Lawrence Berkeley Laboratory. The National Technical Information Service (NTIS) provides documentation, Berkeley, CA.

- [DPEB02] Directive Européenne Commission Européenne, Directive 2002/91/EC du Parlement Européen et du Conseil pour la Performance Energétique des Bâtiments (D.P.E.B.), 2002.
- [DPEBrecast10] Directive Européenne Commission Européenne, Directive 2010/31/EU du Parlement Européen et du Conseil pour la Performance Energétique des Bâtiments (D.P.E.B.), 2010.
- [Duplessis08] Mise en œuvre des contrats de performance énergétique pour l'amélioration des installations de production frigorifique, Duplessis, thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2008
- [Dupont06] Potentiel d'économies d'énergie par les services énergétiques-Application au cycle de vie des équipements de conversion d'énergie, Dupont, thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2006
- [eBenchmark03] e-Energy Benchmark System. National University of Singapore and the Building and Construction Authority of Singapore, 2003
- [Ecodesign09] Directive européenne 2009/125/CE établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits liés à l'énergie (refonte), 21 octobre 2009
- [EECCAC03] Energy Efficiency and Certification of Central Air Conditioners (EECCAC), final report, avril 2003, Adnot et al.
- [EES] Engineers Equation Solver (solveur d'équation EES), Klein S.A., F-Chart software, 2007
- [EIAreport95] Energy Information Administration, Work Report : Measuring Energy Efficiency in the United States' Economy : A Beginning, 1995]
- [EN13779] NF EN 13779 Ventilation dans les bâtiments non résidentiels - Exigences de performances pour les systèmes de ventilation et de conditionnement d'air, Juillet 2007
- [EN15232] NF EN 15232 Performance énergétique des bâtiments, Impact de l'automatisation de la régulation et de la gestion technique du bâtiment, Janvier 2008
- [EN15240] NF EN 15240 Systèmes de ventilation pour les bâtiments Performance énergétique des bâtiments, Lignes directrices pour l'inspection des systèmes de conditionnement d'air, Juillet 2007
- [EN15241] NF EN 15241 Ventilation des bâtiments, Méthodes de calcul des pertes d'énergie dues à la ventilation et à l'infiltration dans les bâtiments commerciaux, Mai 2007
- [EN15243] NF EN 15243 Systèmes de ventilation des bâtiments, calcul de la température des pièces, de la charge et de l'énergie pour les bâtiments équipés de système de conditionnement d'air, Octobre 2007
- [EN15251] EN 15251, 2007, Critères d'ambiance intérieure pour la conception et évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité d'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique.
- [EN15603] NF EN 15603 Performance énergétique des bâtiments, consommation globale d'énergie et définition des évaluations énergétiques, Octobre 2008.
- [ENISO7730] EN ISO 7730, 2005, Ergonomie des ambiances thermiques-Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV-PDD et par des critères de confort thermique local.
- [EnergyPlus] Programme de simulation Energy+ développé par le ministère américain de l'énergie, plus d'information disponible sur <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>

- [EupVent09] Rivière, P., et al., 2009. Preparatory study on the environmental performance of residential room conditioning appliances (airco and ventilation), available on : [www.ecoaircon.eu/](http://www.ecoaircon.eu/).
- [EuPHVAC10] Sustainable Industrial Policy – Building on the Ecodesign Directive – Energy-Using Product Lot 6 – Air Conditioning and Ventilation Systems, Draft Report Task 2, P. Rivière et al, Juin 2010, available on : <http://www.ecohvac.eu/>.
- [Eurovent] Programme de certification Eurovent
- [Filfli06] Optimisation bâtiment/système pour minimiser les consommations dues à la climatisation, Filfli, thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2006
- [Filippin00] C. Filippin, Benchmarking the energy efficiency and greenhouse gases emissions of school building in central Argentina, Building and Environment 35 (2000)
- [Fridmann09] Equilibrages des réseaux de distribution, Fridmann P., Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique BE 9 200, version en ligne le 07/01/2009.
- [Gaitani10] Using principal component and cluster analysis in the heating evaluation of the school building sector, N. Gaitani C. Lehmann, M. Santamouris, G. Mihalakakou and P. Patargias, Applied Energy 2010
- [Grignon10] Développement d'une méthodologie d'analyse coût-bénéfice en vue d'évaluer le potentiel de réduction des impacts environnementaux liés au confort d'été : cas des climatiseurs individuels fixes en France métropolitaine, L. Grignon-Massé, thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2010.
- [Grundfos] Documentation commerciale disponible sur le site internet Grundfos
- [Hale01] Survey of Reliability and Availability Information for Power Distribution, Power Generation, and HVAC Components for Commercial, Industrial, and Utility Installations, Peyton S. Hale, Jr. Robert G. Arno
- [Harmonac09] Livrable D5.2 An initial set of ECOs, projet HarmonAC, 2009, Adnot, Caillet.
- [HarmonacECO10] WP5 Report, final report, Harmonac Project, Adnot J. Caillet J., 2010
- [HarmonacFT10] Field Trial Reports, Harmonac Project, 2010
- [Helcke96] G.A. Helcke et al, A detailed comparison of energy audits carried out by four separate companies on the same set of buildings, Energy and Buildings Volume 14, Issue 2, 1990, Pages 153-164
- [Hous01] An Expert Rule Set for Fault Detection in Air-Handling Units, House et al, Ashrae Transactions 2001
- [IPMVP07] International Performance Measurement and Verification Protocol (2007)
- [Jacquard04] La pratique du froid, P. Jacquard, S. Sandre, PYC édition DUNOD, 2<sup>ème</sup> édition, 2004
- [JOarrete1] Journal Officiel de la République Française, n°0098 du 27 avril 2010 page 7634, texte n° 11, Arrêté du 16 avril 2010 définissant les critères de certification des compétences des personnes physiques réalisant l'inspection périodique des systèmes de climatisation et des pompes à chaleur réversibles dont la puissance frigorifique est supérieure à 12 kilowatts et les critères d'accréditation des organismes de certification, NOR: DEVE1009456A
- [JOarrete2] Journal Officiel de la République Française, n°0098 du 27 avril 2010 page 7636 texte n° 12, Arrêté du 16 avril 2010 relatif à l'inspection périodique des systèmes



de climatisation et des pompes à chaleur réversibles dont la puissance frigorifique est supérieure à 12 kilowatts, NOR: DEVE1009420A

[JODECRET] Journal Officiel de la République Française, n°0078 du 2 avril 2010 page 6418, texte n° 1, Décret n° 2010-349 du 31 mars 2010 relatif à l'inspection des systèmes de climatisation et des pompes à chaleur réversibles, NOR: DEVE0930941D

[KeepCool10] Projet Européen Keep Cool 2010, Transforming the market from “cooling” to “sustainable summer comfort”, funded by the Intelligent Energy Europe (IEE) programme, Grignon-Massé et al., final reports 2010

[Kels05] Application of Fault Detection and Diagnosis Techniques to Automated Functional Testing, Kelson R. Wright J.,ASHRAE Transactions 2005

[Krarti01] Guide technique d'audit énergétique, Krarti M. et al., 2001, adapté en français de l'ouvrage Audit of Building Systems, An Engineering Approach, Krarti M., CRC Press, 2000.

[Lam10] Lam Joseph C., Kevin K.W. Wan, Liu Yang, Principal component analysis and long-term building energy simulation correlation, Energy Conversion and Management 51 (2010) 135–139

[LCEE10] Lettre d'information Certificats d'économie d'énergie, Direction Générale de l'Ecologie et du Climat, Juin 2010

[Lee09] Benchmarking the performance of building energy management using data envelopment analysis, Wen-Shing Lee, Kuei-Peng Lee, Applied Thermal Engineering 29 (2009) 3269-3273

[Lee10] Evaluating and ranking energy performance of office buildings using fuzzy measure and fuzzy integral, Wen-Shing Lee, Energy Conversion and Management 51 (2010) 197-203

[Memotech96] Mémotech génie électrique, P. Dal Zotto et al., 1996

[Morisot00] Modèle de batterie froide à eau glacée adapté à la maîtrise des consommations d'énergie en conception de bâtiments climatisés et en conduite d'installation, Morisot, thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2000

[Nikolaou09] Virtual Building Dataset for energy and indoor thermal comfort benchmarking of office buildings in Greece, Energy and Buildings, Volume 41, Issue 12, December 2009, Pages 1409-1416, T. Nikolaou, I. Skias, D. Kolokotsa, G. Stavrakakis

[NORMJAP06] Standard of the Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association JRA 4048:2006, Calculating method of annual power consumption of package air conditioners

[Orphelin99] Méthodes pour la reconstitution de courbes de charges agrégées des usages thermique de l'électricité, Orphelin M., Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris

[Ouederni90] Modélisation et simulation des régulations dans les cades de calcul thermique du bâtiment, Ouederni M, Thèse de doctorat Ecole des Mines de Paris, 1990.

[POPE07] Loi sur l'énergie 2005 (Loi Pope), modifié par le décret n°2007-363 publié le 19 mars 2007.

[Redden1996] Effect of variable Flow on Centrifugal Chiller Performance, ASHRAE Transactions, 1996, Redden

[Rivière04] Performances saisonnières des groupes de production d'eau glacée, Philippe Rivière, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris.

[RT82] Réglementation thermique française 1982

- [RT00] Réglementation thermique française 2000
- [RT05] Réglementation thermique française 2005
- [Sala03] Fondamentaux d'hydraulique pratique, J. La Sala, 2003, ISBN 2 – 9520217
- [Salmson] Documentation commerciale disponible sur le site internet Salmson
- [Sfeir05] A Methodology to Evaluate Pumping Energy Consumption in GCHP Systems, Sfeir A., Bernier M., ASHRAE Transaction Winter 2005.
- [Sharp96] T.Sharp, Energy benchmarking in commercial office buildings, ACEEE 1996 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, 4 (1996) 321-329
- [Filfli06] Optimisation bâtiment / système pour minimiser les consommations dues à la climatisation, Filfli S., Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2006
- [SimAudit] Outil de simulation dynamique développé dans le cadre du projet HarmonAC, projet IEE, 2010.
- [Simbad] Simulation of Buiding and Devices, développé au CSTB, 2004
- [Spitler89]. Spitler JD, Fisher DE, Zietlow DC, A primer on the use of influence coefficients in building simulation, Proceeding of the building simulation'89 conference ; 1989, p299-304
- [Trčka10] Overview of HVAC system simulation, Marija Trčka, Jan L.M. Hensen, Automation in Construction 19 (2010) 93–99
- [TRNSYS] A Transient Simulation Program, Klein S.A., 2000
- [Tschudi04] Using Benchmarking to Identify Energy Efficiency Opportunity in Cleanrooms : The Lab 21 Approach, Tschudi W., Rumsey P., ASHRAE Transaction Annual Meeting 2004
- [Wesper10] Catalogue commercial Wesper, Premi @ir, 2010
- [Wilo] Documentation commerciale disponible sur le site internet Wilo
- [WiloT] Documentation technique d'une pompe Wilo
- [Yik01] Predicting air-conditioning energy consumption of a group of buildings using different heat rejection methods, F.W.H. Yik, J. Burnett, I. Prescott, Energy and Buildings 33 (2001) 151-166



# Annexe 1 Liste des opportunités énergétiques

Extrait du projet [Harmonac10]

## Famille Enveloppe

Code	ECO
E1.#	<b>Solar gain reduction / Daylight control improvement</b>
E1.1	Install window film or tinted glass
E1.2	Install shutters, blinds, shades, screens or drapes
E1.3	Optimize control of blinds
E1.4	Replace internal blinds with external systems
E1.5	Close off balconies to make sunspace/greenhouse
E1.6	Modify vegetation to save energy
E1.7	Maintain windows and doors
E2.#	<b>Ventilation / Air movement / Air leakage improvement</b>
E2.1	Generate possibility to close/open windows and doors to match climate
E2.2	Ensure proper ventilation of attic spaces
E2.3	Optimise air convective paths in shafts and stairwells
E2.4	Correct excessive envelope air leakage
E2.5	Roll shutter cases: insulate and seal air leaks
E2.6	Generate possibility of night time overventilation
E2.7	Add automatic door closing system between cooled and uncooled space
E2.8	Replace doors with improved design in order to reduce air leakage
E3.#	<b>Envelope insulation</b>
E3.1	Upgrade insulation of flat roofs externally
E3.2	Upgrade attic insulation
E3.3	Add insulation to exterior walls by filling cavities
E3.4	Add insulation to exterior wall externally
E3.5	Add insulation to basement wall externally
E3.6	Upgrade insulation of ground floor above crawl space
E3.7	Locate and minimize the effect of thermal bridges
E3.8	Cover, insulate or convert unnecessary windows and doors
E3.9	Use double or triple glaze replacement
E4.#	<b>Other actions aimed at load reduction</b>
E4.1	Reduce effective height of room
E4.2	Use appropriate colour exterior
E4.3	Employ evaporative cooling roof spray
E4.4	Provide means of reducing electrical peak demand through load shedding
E4.5	Replace electrical equipment with Energy Star or low consumption types
E4.6	Replace lighting equipment with low consumption types
E4.7	Modify lighting switches according to daylight contribution to different areas
E4.8	Introduce daylight / occupation sensors to operate lighting switches
E4.9	Move equipments (copiers, printers, etc.) to non conditioned zones
E4.10	Reduce lighting consumption by using adequate illumination level

Famille équipements

Code	ECO
P1.#	<b>BEMS and controls / Miscellaneous</b>
P1.1	Install BEMS system
P1.2	Define best location for new electrical and cooling energy meters
P1.3	Modify controls in order to sequence heating and cooling
P1.4	Modify control system in order to adjust internal set point values to external climatic conditions
P1.5	Generate the possibility to adopt variable speed control strategy
P1.6	Use class 1 electrical motors
P1.7	Reduce power consumption of auxiliary equipment
P1.8	Define a better place for indoor conditions measurement
P2.#	<b>Cooling equipment / Free cooling</b>
P2.1	Minimise adverse external influences (direct sunlight, air flow obstructions, etc.) on cooling tower and air cooled condenser (AHU, packaged, split, VRF systems)
P2.2	Reduce compressor power or fit a smaller compressor
P2.3	Split the load among various chillers
P2.4	Repipe chillers or compressors in series or parallel to optimise circuiting
P2.5	Improve central chiller / refrigeration control
P2.6	Replace or upgrade cooling equipment and heat pumps
P2.7	Consider feeding condenser with natural water sources
P2.8	Apply evaporative cooling
P2.9	Consider using ground water for cooling
P2.10	Consider indirect free cooling using the existing cooling tower (free
P2.11	Consider Indirect free cooling using outdoor air-to-water heat exchangers
P2.12	Consider the possibility of using waste heat for absorption system
P2.13	Consider cool storage applications (chilled water, water ice, other changing materials)
P2.14	Consider using condenser rejection heat for air reheating
P3.#	<b>Air handling / Heat recovery / Air distribution</b>
P3.1	Reduce motor size (fan power) when oversized
P3.2	Relocate motor out of air stream
P3.3	Use the best efficient fans
P3.4	Use the best class of AHU
P3.5	Consider applying chemical de-humidification
P3.6	Apply variable flow rate fan control
P3.7	Consider conversion to VAV
P3.8	Exhaust (cool) conditioned air over condensers and through cooling towers
P3.9	Introduce exhaust air heat recovery
P3.10	Consider applying demand-controlled ventilation
P3.11	Generate possibility to increase outdoor air flow rate (direct free cooling)
P3.12	Replace ducts when leaking
P3.13	Modify ductwork to reduce pressure losses
P3.14	Install back-draught or positive closure damper in ventilation exhaust

	system
P3.15	Install adiabatic humidification instead of steam humidifier
P4.#	<b>Water handling / Water distribution</b>
P4.1	Use the best class of pumps
P4.2	Modify pipework to reduce pressure losses
P4.3	Convert 3-pipe system to 2-pipe or 4-pipe system
P4.4	Install separate pumping to match zone requirements
P4.5	Install variable volume pumping
P5.#	<b>Terminal units</b>
P5.1	Consider applying chilled ceilings or chilled beams
P5.2	Consider introducing re-cool coils in zones with high cooling loads
P5.3	Increase heat exchanger surface areas
P5.4	Consider displacement ventilation
P5.5	Install localised HVAC system (in case of local discomfort)
P6.#	<b>System replacement (in specific limited zones)</b>
P6.1	Consider water loop heat pump systems
P6.2	Consider VRF (Variable Refrigerant Flow) systems

### Famille opération et maintenance

Code	ECO
O1.#	<b>Facility management</b>
O1.1	Generate instructions ("user guide") targeted to the occupants
O1.2	Hire or appoint an energy manager
O1.3	Train building operators in energy – efficient O&M activities
O1.4	Introduce an energy – efficient objective as a clause in each O&M contract
O1.5	Introduce benchmarks, metering and tracking as a clause in each O&M contract, with indication of values in graphs and tables
O1.6	Update documentation on system / building and O&M procedures to maintain continuity and reduce troubleshooting costs
O1.7	Check if O&M staff are equipped with state – of – the – art diagnostic tools
O2.#	<b>General HVAC system</b>
O2.1	Use an energy accounting system to locate savings opportunities and to track and measure the success of energy – efficient strategies
O2.2	Shut off A/C equipments when not needed
O2.3	Shut off auxiliaries when not required
O2.4	Maintain proper system control set points
O2.5	Adjust internal set point values to external climatic conditions
O2.6	Implement pre-occupancy cycle
O2.7	Sequence central heating and cooling
O2.8	Adopt variable speed control strategy
O2.9	Electrical balance of equipment
O3.#	<b>Cooling equipment</b>
O3.1	Shut chiller plant off when not required
O3.2	Sequence operation of multiple units
O3.3	Operate chillers or compressors in series or parallel
O3.4	Track and optimize chillers operation schedule

O3.5	Maintain proper starting frequency and running time of (reversible) chillers
O3.6	Improve part load operation control
O3.7	Maintain proper evaporating and condensing temperatures
O3.8	Raise chilled water temperature and suction gas pressure
O3.9	Lower condensing water temperature and pressures
O3.10	Check sensor functioning and placement for (reversible) chillers
O3.11	Maintain efficient defrosting (reversible chillers)
O3.12	Maintain proper heat source/sink flow rates
O3.13	Maintain functioning of (reversible) chiller expansion device
O3.14	Check (reversible) chiller stand-by losses
O3.15	Maintain full charge of refrigerant
O3.16	Clean finned tube evaporator / condenser air side and straighten damaged fins
O3.17	Clean condenser tubes periodically
O3.18	Repair or upgrade insulation on chiller
O3.19	Clean and maintain cooling tower circuits and heat exchanger surfaces
O3.20	Apply indirect free cooling using the existing cooling tower (free chilling)
O4.#	<b>Fluid (air and water) handling and distribution</b>
O4.1	Consider modifying the supply air temperature (all-air and air-and-water systems)
O4.2	Perform night time overventilation
O4.3	Shut off coil circulators when not required
O4.4	Replace mixing dampers
O4.5	Adjust fan belts (AHU, packaged systems)
O4.6	Eliminate air leaks (AHU, packaged systems)
O4.7	Increase outdoor air flow rate (direct free cooling)
O4.8	Adjust/balance ventilation system
O4.9	Reduce air flow rate to actual needs
O4.10	Check maintenance protocol in order to reduce pressure losses
O4.11	Reduce air leakage in ducts
O4.12	Clean fan blades
O4.13	Maintain drives
O4.14	Clean or replace filters regularly
O4.15	Repair/upgrade duct, pipe and tank insulation
O4.16	Consider the possibility to increase the water outlet – inlet temperature difference and reduce the flow rate for pumping power reduction
O4.17	Balance hydronic distribution system
O4.18	Bleed air from hydronic distribution system
O4.19	Switch off circulation pumps when not required
O4.20	Maintain proper water level in expansion tank
O4.21	Repair water leaks
O4.22	Reduce water flow rates to actual needs

## Annexe 2 Exemples de fiches synthétiques d'opportunités énergétiques

Les fiches synthétiques de cette annexe ont été développées dans le cadre du projet [Harmonac10].

E1.2 INSTALL SHUTTERS, BLINDS, SHADES, SCREENS OR DRAPS


1 EXISTING SUBSYSTEMS ON WHICH THE ECO MAY APPLY

Window and glass without shading device. This ECO affects the heating and cooling demand, but also the electric demand for artificial light.

2 CONSIDERED ACTIONS


2.1 CONSIDERED ACTION 1

To install venetian blinds (external mobile protections)



2.2 CONSIDERED ACTION 2

To install screen blinds (external mobile protections).



3 TECHNICAL DATA TO REQUEST TO OWNER/MANAGER OR TO FIND DIRECTLY (MANUFACTURER DATA)

- Building size (horizontal surface, number of floor), Vertical (opaque and glazed) surface.
- Rate of conditioned space.
- Building location.

4 TECHNICAL OBSERVATIONS TO BE MADE ON SITE

- To verify reliability or to complete technical data.
- To identify a possible effect of shading by other building, trees,...

5 MONITORING OF EXISTING SITUATIONS

- Determination of glazing properties in place.

6 CRITERION FOR ECO APPLICABILITY

Installing inner mobile protection will not convert into air conditioning load reduction because visible solar

gains are converted in heat inside. This criterion is reserved for outside protection.

6.1 SAVINGS ESTIMATION

The estimation of the energy savings depends on the location of the building and its type (Size and glazed surface). a method has been established according to the Keep Cool II project results[3].

To estimate savings you should identify the type of buildings from the table below in which we distinguish between two typical office buildings :

Building Types

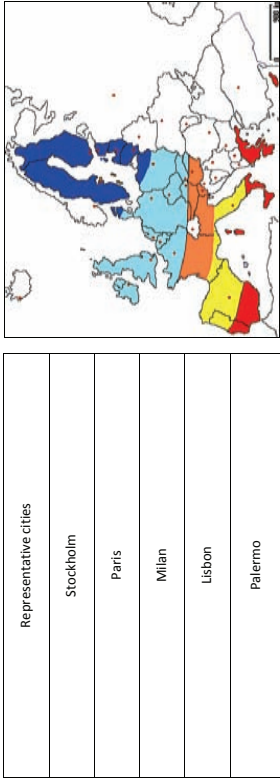
	Type	Number of floors	Space disposition	Glazed areas [% of the vertical surface]	Air conditioned Space [% of total space]
Office 1	Large building	12	Open space	45	80%
Office 2	Small building (Suburban)	2	Cellular	30	

The major difference between this two types is the size of the building.

After selecting the building category, you should identify the climatic area of the building in the following figure.

Regarding location, it has been decided to define several climatic areas for Europe. Each area is represented by a city.

Climatic areas



When identifying the building and the climatic area you will find in the next page the potential savings that have been derived using TRNSYS for this 2 typical office buildings [3] according to the climatic area, (the main assumptions are given in section 8).

This ECO affects the heating and cooling demand, but also the electric demand for artificial light. There is a trade off between solar protection for HVAC and the necessity to maintain natural light.

Negative values represent increases in energy consumption.

You must apply manufacturer recommendation to set up shading protection.

The influence of shading device should maintain a minimum of daylighting in the inner space. If additional artificial lighting is required, it should be added to the new cooling load evaluation.

For south of France location, there is advice about shading device nature and position as a function of orientation in [2]

Black zone : mobile interior protection.

Dashed zone: mobile exterior protection with a solar factor <0.2

Grey zone : Fins protections.

## 8 ADDITIONAL SUPPORT

### 8.1 TYPICAL SHADING COEFFICIENT[3]

The typical means of shading are explored on this figure and can be used in the Harmonac simulation tool to estimate potential savings.

Annual consumption and saving values for Office 2:

	Heating (fuel) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (electric) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Lighting (electric) [kWh/m <sup>2</sup> ]
Stockholm			
Reference-Consumption	114.8	21.5	36.5
Screen blind - Savings	-5.7	5.5	-0.8
Venetian Blind-Savings	-8.0	7.1	-1
Paris			
Reference-Consumption	61.3	24.3	34.4
Screen blind - Savings	-3.5	5.0	-0.7
Venetian Blind-Savings	-4.8	6.5	-0.8
Milan			
Reference-Consumption	107.5	26.5	32
Screen blind - Savings	-5.3	4.5	-0.8
Venetian Blind-Savings	-7.3	5.7	-0.9
Lisbon			
Reference-Consumption	14.2	46.3	27.2
Screen blind - Savings	-2.3	9.0	-0.8
Venetian Blind-Savings	-3.3	11.6	-1.1
Palermo			
Reference-Consumption	15.5	55.7	27.7
Screen blind - Savings	-2.5	7.9	-0.7
Venetian Blind-Savings	-3.5	10.3	-1

Annual consumption and saving values for Office 1:

	Heating (fuel) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (electric) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Lighting (electric) [kWh/m <sup>2</sup> ]
Stockholm			
Reference-Consumption	143.0	24.9	22.2
Screen blind - Savings	-6.5	7.3	-0.1
Venetian Blind-Savings	-9.0	9.3	-0.1
Paris			
Reference-Consumption	40.3	32.1	19.5
Screen blind - Savings	-3.5	7.0	0.1
Venetian Blind-Savings	-4.8	9.1	0.1
Milan			
Reference-Consumption	55.5	46.9	18.5
Screen blind - Savings	-7.2	10.3	-0.1
Venetian Blind-Savings	-8.8	12.7	-0.1
Lisbon			
Reference-Consumption	7.5	75.3	17.6
Screen blind - Savings	-1.0	15.0	-0.2
Venetian Blind-Savings	-1.3	19.9	-0.2
Palermo			
Reference-Consumption	3.8	78.4	17.8
Screen blind - Savings	-1.0	13.5	-0.1
Venetian Blind-Savings	-1.3	17.8	-0.1

If the characteristics of the inspected building are different from the typical buildings estimated in this method, you better use the Harmonac simulation tool to estimate savings. For this you will need the Shading Coefficient (SC) which you can find in the additional support section (8.1) .

You should compare the investment cost of installing blinds with the economic savings generated by the energy savings (fuel and electricity).

## 7 RECOMMENDATION FOR REALISATION OF ECO

Source : Keep Cool II Project, WP 4 [3]

Typical optical properties of shading device material.[1]

As a matter of convenience for applicants and building inspectors, the first order approximation used in [4] enables to convert center of glass (g) value (solar factor) at normal incidence values to SC (shading coefficient) values with the following equation:

$$SC = \frac{g_{NEW}}{g_{ref}} = \frac{g_{NEW}}{0.87}$$

For solar factor typical values,(and calculation method) see [1]

8.2 METHOD OF CALCULATING ENERGY SAVINGS FROM [3]

Improvement actions do not only impact cooling needs but also other usages. In the study [3], savings values include the following usages: lighting, cooling and heating.

Assumptions on typical seasonal efficiencies of European heating and cooling appliances are necessary to derive annual savings in terms of final energy from savings in terms of cooling and heating needs. A distinction should be made between electricity savings and fuel savings. Regarding heating and cooling, the following equations must be used:

$$\Delta\_E_C = \frac{\Delta\_CN}{SEER}$$
$$\Delta\_E_H = W_{FUE} * \frac{\Delta\_HN}{\eta_{FUE}}$$

Annual fuel savings are assumed to be the result of heating needs reduction:

$$\Delta\_F = W_{FUE} * \frac{\Delta\_HN}{\eta_{FUE}}$$

Where:

$\Delta\_E_C$  is the annual savings in terms of electricity stemming from cooling demand reduction [kWh/m²/y]

$\Delta\_E_H$  is the annual savings in terms of electricity stemming from heating demand reduction [kWh/m²/y]

$\Delta\_CN$  is the annual saving in terms of cooling needs [kWh/m²/y]

$SEER$  is the Seasonal Energy Efficiency Ratio in cooling mode representative of the AC existing stock

$\Delta\_HN$  is the annual saving in terms of heating needs [kWh/m²/y]



© Harmonac/Armines

$\Delta\_F$  is the annual savings in terms of fuel [kWh/m²/y]

$\eta_{FUE}$  is the Seasonal efficiency in heating mode representative of the stock of fuel using equipments

$\eta_{FUE}$  is the Seasonal efficiency in heating mode representative of the stock of electricity using equipments (heat pump, resistive...)

$W_{FUE}$  and  $W_{FUE}$  are the repartition factors between electricity using equipments and fuel using equipments ( $W_R + W_B = 1$ ).

As a first approach, the seasonal efficiency for heating is assumed at 60% (fuel equipments). Seasonal efficiency (SEER) for air conditioning used is 1.5. These seasonal efficiencies are for typical system (including auxiliaries). These values can be modified according to your system.

References

- [1] prEN 13363-1 Solar protection devices combined with glazing –Calculation of solar and light transmittance – Part1: Simplified method
- [2] Confort d'été en PACA, fiche de recommandation de l'Agence Régionale de l'énergie.
- [3] Keep Cool II Project, WP 4 : Assessment of energy savings related to sustainable summer comfort, Grignon-Massé L., Marchio D. et al., 2009, available on: <http://www.keep-cool.eu/>
- [4] ASHRAE Handbook of fundamentals, 1997, Chapter 29.23, equation 38.

9 REMARKS



© Harmonac/Armines



E1.# Solar gain reduction / daylight control improvement

E1.3 OPTIMIZE CONTROL OF BLINDS

1 EXISTING SUBSYSTEMS ON WHICH THE ECO MAY APPLY

Movable shading device (E1.2 with motor). This ECO affects heating and cooling demand, but also the electric demand for artificial light.

2 CONSIDERED ACTIONS:

2.1 CONSIDERED ACTION 1

To operate shading device with outdoor illuminance control.

2.2 CONSIDERED ACTION 2

To operate shading device with a temperature control and an indoor illuminance (lux) limit.

3 TECHNICAL DATA TO REQUEST TO OWNER/MANAGER OR TO FIND DIRECTLY (MANUFACTURER DATA)

- Vertical (opaque and glazed) surface, number of floor.
- Building location.
- Rate of air conditioned space.

4 TECHNICAL OBSERVATIONS TO BE MADE ON SITE

- To verify if motorized shading is ready to use (on/off).
- Possibilities of control system for the shading devices, what mode is used at the moment.

5 MONITORING OF EXISTING SITUATIONS

- Hours of occupation.
- Behaviour of user.

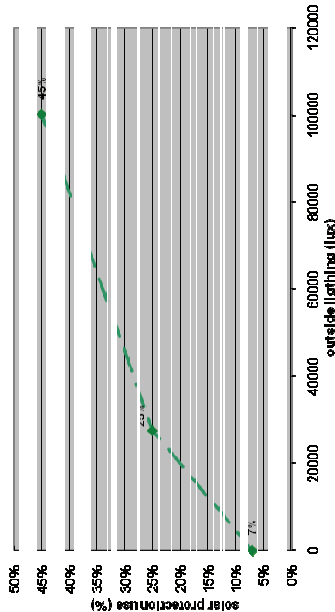
6 CRITERION FOR ECO APPLICABILITY

6.1 BLINDS POSITION

To determine the proportion of glazing actually covered by solar protection, search the usage of blinds that occupants of offices make. for this purpose, on site, measures involving relationship between outdoor

illumination and position of the solar protections have been exploited in [1].

The following figure presents blinds position used in the Keep Cool Project II [2] and are extracted from [1]:



Solar protections should remain open during unoccupied periods in heating season and closed in cooling season to maximize savings.

6.2 SAVINGS ESTIMATION

The estimation of the energy savings depends on the location of the building and its glazed surface for each orientation. a method has been established according to the Keep Cool II project results[2].

To estimate savings you should identify the type of buildings from the table below in which we distinguish between two typical office buildings :

Building Types

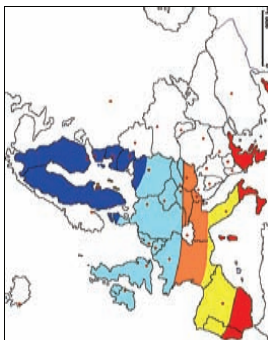
	Type	Number of floors	Space disposition	Glazed areas [% of the vertical surface]	Air conditioned Space [% of total space]
Office 1	Large building	12	Open space	45	80%
Office 2	Small building (Suburban)	2	Cellular	30	

The major difference between this two types is the size of the building.

After selecting the building category, you should identify the climatic area of the building in the following figure. Regarding location, it has been decided to define several climatic areas for Europe. Each area is represented by a city.

## Climatic areas

Representative cities
Stockholm
Paris
Milan
Lisbon
Palermo



The results presented below represent the energy savings realized through automation of blinds in the Keep Cool Project [2]. The savings are the difference between the savings of manual and automatic blinds, and have been studied in two reference office buildings (the main assumptions are given in section 8.1).

Negative values represent increases of energy consumption, and manifest itself in the electric demand for artificial lighting

## Annual consumption and saving values for Office 1:

	Heating (fuel) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (electric) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Lighting (electric) [kWh/m <sup>2</sup> ]
<b>Stockholm</b>			
Reference : Screen blind manual control	149,5	17,6	22,3
Savings : Automation of Screen blinds	0,0	9,0	-0,1
Reference : Venetian manual control	152,0	15,5	22,3
Savings : Automation of venetian	2,0	8,8	-0,4
<b>Paris</b>			
Reference : Screen blind manual control	43,8	25,1	19,4
Savings : Automation of Screen blinds	3,0	12,8	-0,2
Reference : Venetian manual control	45,2	23,1	19,4
Savings : Automation of venetian	4,2	14,7	-0,6
<b>Milan</b>			
Reference : Screen blind manual control	62,7	36,6	18,6
Savings : Automation of Screen blinds	6,8	13,5	-0,5
Reference : Venetian manual control	64,3	34,1	18,6
Savings : Automation of venetian	8,2	16,8	-1
<b>Lisbon</b>			
Reference : Screen blind manual control	8,5	60,3	17,8
Savings : Automation of Screen blinds	0,2	26,6	-0,9
Reference : Venetian manual control	8,8	55,4	17,8
Savings : Automation of venetian	0,3	31,0	-1,2
<b>Palermo</b>			
Reference : Screen blind manual control	4,8	64,9	17,9
Savings : Automation of Screen blinds	0,7	24,9	-0,9
Reference : Venetian manual control	5,2	60,6	17,9
Savings : Automation of venetian	0,8	29,9	-1,4

## Annual consumption and saving values for Office 2:

	Heating (fuel) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (electric) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Lighting (electric) [kWh/m <sup>2</sup> ]
<b>Stockholm</b>			
Reference : Screen blind manual control	120,5	16,1	37,3
Savings : Automation of Screen blinds	4,7	7,5	-5,4
Reference : Venetian manual control	122,8	14,5	37,5
Savings : Automation of venetian	6,7	7,1	-10
<b>Paris</b>			
Reference : Screen blind manual control	64,8	19,3	35,1
Savings : Automation of Screen blinds	6,5	6,3	-3,9
Reference : Venetian manual control	66,2	17,7	35,2
Savings : Automation of venetian	7,5	6,1	-8,3
<b>Milan</b>			
Reference : Screen blind manual control	112,8	22,1	32,8
Savings : Automation of Screen blinds	5,0	6,2	-3,7
Reference : Venetian manual control	114,8	20,8	32,9
Savings : Automation of venetian	6,8	6,2	-8,1
<b>Lisbon</b>			
Reference : Screen blind manual control	16,5	37,3	28
Savings : Automation of Screen blinds	2,0	10,5	-6,2
Reference : Venetian manual control	17,5	34,7	28,3
Savings : Automation of venetian	3,0	10,3	-12,4
<b>Palermo</b>			
Reference : Screen blind manual control	18,0	47,8	28,4
Savings : Automation of Screen blinds	2,2	12,3	-6,8
Reference : Venetian manual control	19,0	45,4	28,7
Savings : Automation of venetian	3,2	13,0	-13,7

## 7 RECOMMENDATION FOR REALISATION OF ECO



© Harmonac/Armines



© Harmonac/Armines

In addition to the control of blinds, control of artificial lighting can be applied in the same way as a function of the indoor illuminance (see ECO E4.8).

8 ADDITIONAL SUPPORT

8.1 METHOD OF CALCULATING ENERGY SAVINGS FROM [2]

Improvement actions do not only impact cooling needs but also other usages. In the study [2], savings values include the following usages: lighting, ventilation, cooling and heating.

Assumptions on typical seasonal efficiencies of European heating and cooling appliances are necessary to derive annual savings in terms of final energy from savings in terms of cooling and heating needs. A distinction should be made between electricity savings and fuel savings. Regarding heating and cooling, the following equations must be used:

$$\Delta\_E_C = \frac{\Delta\_CN}{SEER}$$
$$\Delta\_E_H = W_{FUE} * \frac{\Delta\_HN}{\eta_{HE}}$$

Annual fuel savings are assumed to be the result of heating needs reduction:

$$\Delta\_F = W_{FUE} * \frac{\Delta\_HN}{\eta_{HE}}$$

Where:

$\Delta\_E_C$  is the annual savings in terms of electricity stemming from cooling demand reduction [kWh/m²/y]

$\Delta\_E_H$  is the annual savings in terms of electricity stemming from heating demand reduction [kWh/m²/y]

$\Delta\_CN$  is the annual saving in terms of cooling needs [kWh/m²/y]

$SEER$  is the Seasonal Energy Efficiency Ratio in cooling mode representative of the AC existing stock

$\Delta\_HN$  is the annual saving in terms of heating needs [kWh/m²/y]

$\Delta\_F$  is the annual savings in terms of fuel [kWh/m²/y]

$\eta_{HE}$  is the Seasonal efficiency in heating mode representative of the stock of fuel using equipments

$\eta_{ELE}$  is the Seasonal efficiency in heating mode representative of the stock of electricity using equipments (heat pump, resistive...)

$W_{FUE}$  and  $W_{ELE}$  are the repartition factors between electricity using equipments and fuel using equipments ( $W_R + W_B = 1$ ).

As a first approach, the seasonal efficiency for heating is assumed at 60% (fuel equipments). Seasonal efficiency



© Harmonac/Armines

(SEER) for air conditioning used is 1.5. These seasonal efficiencies are for typical system (including auxiliaries). These values can be modified according to your system.

Reference

[1] Impact de la gestion de l'éclairage et des protections solaires sur la consommation de bâtiments de bureaux climatisés, Jean-Marie Alessandrini et al, Climamed 2006

[2] Keep Cool II Project, WP 4 : Assessment of energy savings related to sustainable summer comfort, Grignon-Massé L., Marchio D. et al., 2009, available on: <http://www.keep-cool.eu/>

9 REMARKS



© Harmonac/Armines

E2.1 GENERATE POSSIBILITY TO CLOSE/OPEN WINDOWS AND DOORS TO MATCH CLIMATE

1 EXISTING SUBSYSTEMS ON WHICH THE ECO MAY APPLY

Windows and doors.

2 CONSIDERED ACTIONS

2.1 CONSIDERED ACTION 1

Modify/Install window/doors which can be operated by occupants to match climate.



Source : Keep Cool II Project, WP 4 [1]

2.2 CONSIDERED ACTION 2

To give possibility to operate locally existing motorized windows.

2.3 CONSIDERED ACTION 3

Install automatic operable opening on 50% of the glazed area with a night-time and day-time control algorithm.

3 TECHNICAL DATA TO REQUEST TO OWNER/MANAGER OR TO FIND DIRECTLY (MANUFACTURER DATA)

4 TECHNICAL OBSERVATIONS TO BE MADE ON SITE

- To check the possibility of operable windows and doors.
- To check possible problems regarding security (exhaust fumes, fire protection, dangerous height) and noise.

5 MONITORING OF EXISTING SITUATIONS



© Harmonac/Armines

6 CRITERION FOR ECO APPLICABILITY

A control strategy is necessary for an effective use of natural ventilation. However, there is only a small difference between various strategies, ranging from simple fixed-rules to complicated predictive algorithms. The most important consideration is to apply some sensible control mainly to avoid overcooling.

6.1 NIGHT-TIME VENTILATION

Night ventilation is designed to continue all night provided that the following conditions are met:

- The inside temperature exceeds the heating set-point temperature
- The outside air temperature is greater than 12 °C

We will consider the following rules:

- From 8:00 pm to 7:00 am
- $T_{ext} < T_{int} - 2^{\circ}C$ .
- The inside temperature exceeds the heating set-point temperature
- The outside temperature is greater than 12 °C

6.2 DAY-TIME VENTILATION

In day-time, the following control algorithm based on what is currently done for night-time ventilation is kept:

- From 7:00 am to 8:00 pm
- $T_{ext} < T_{int} - 2^{\circ}C$ .
- The inside temperature exceeds the heating set-point temperature
- The outside temperature is greater than 12 °C

6.3 SAVINGS ESTIMATION

The estimation of the energy savings depends on the location of the building and its type (size and glazed), a method has been established according to the Keep Cool II project results[3].

To estimate savings you should identify the type of buildings from the table below in which we distinguish between two typical office buildings :

Building Types

Type	Number of floors	Space disposition	Glazed areas [% of the vertical surfaces]	Air conditioned Space [% of total space]
------	------------------	-------------------	---	--



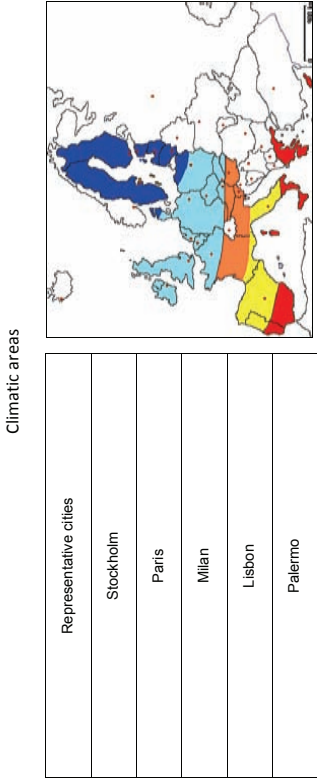
© Harmonac/Armines

Office 1	Large building	12	Open space	45	80%
Office 2	Small building (Suburban)	2	Cellular	30	

The major difference between this two types is the size of the building.

After selecting the building category, you should identify the climatic area of the building in the following figure.

Regarding location, it has been decided to define several climatic areas for Europe. Each area is represented by a city.



When identifying the building and the climatic area you will find hereunder the potential savings that have been derived using TRNSYS for this 2 typical office buildings [1] according to the climatic area, (the main assumptions are given in section 8).

This ECO affects the heating and cooling demand, but also the electric demand for artificial light.

Annual consumption and saving values for Office 1:

	Stockholm	Cooling (Electric) [kWh/m²]
Reference consumption		21.5
Day/Night free cooling savings		9.1
Night free cooling savings		18.1
Reference consumption	Paris	
Day/Night free cooling savings		24.3
Night free cooling savings		10.9
Reference consumption	Milan	
Day/Night free cooling savings		18.8
Reference consumption		26.5
Day/Night free cooling savings		8.1
Night free cooling savings		12.3
Reference consumption	Lisbon	
Day/Night free cooling savings		46.3
Night free cooling savings		10.1
Reference consumption	Palermo	
Day/Night free cooling savings		21.2
Reference consumption		55.7
Day/Night free cooling savings		10.6
Night free cooling savings		17.7

Annual consumption and saving values for Office 1:

	Stockholm	Cooling (Electric) [kWh/m²]
Reference consumption		24.9
Day/Night free cooling savings		4
Night free cooling savings		12.9
Reference consumption	Paris	
Day/Night free cooling savings		32.1
Night free cooling savings		18.9
Reference consumption	Milan	
Day/Night free cooling savings		25.1
Reference consumption		46.9
Day/Night free cooling savings		19.3
Night free cooling savings		29.1
Reference consumption	Lisbon	
Day/Night free cooling savings		75.3
Night free cooling savings		12
Reference consumption	Palermo	
Day/Night free cooling savings		31.6
Reference consumption		78.4
Day/Night free cooling savings		23
Night free cooling savings		36

### 7 RECOMMENDATION FOR REALISATION OF ECO

- To stop HVAC according to the opening of window and doors, i.e. to install a sensor which detects the position (open/closed) of windows/doors.
- To check that air change is sufficient when window is closed

### 8 ADDITIONAL SUPPORT

#### 8.1 METHOD OF CALCULATING ENERGY SAVINGS FROM [3]:

Assumptions on typical seasonal efficiencies of European heating and cooling appliances are necessary to derive annual savings in terms of final energy from savings in terms of cooling and heating needs. A distinction should be made between electricity savings and fuel savings. Regarding heating and cooling, the following equations must be used:

$$\Delta\_E_C = \frac{\Delta\_CN}{SEER}$$

$$\Delta\_E_H = W_{EUE} * \frac{\Delta\_HN}{\eta_{EUE}}$$

E2.# Ventilation / Air movement / Air leakage improvement

E2.6 GENERATE POSSIBILITY OF NIGHT TIME OVERVENTILATION	
1 EXISTING SUBSYSTEMS ON WHICH THE ECO MAY APPLY	<ul style="list-style-type: none"><li>Ducts, fans, motor for mechanical ventilation.</li><li>Windows allowing natural ventilation.</li></ul>
2 CONSIDERED ACTIONS	
2.1 ACTION 1	To increase fan motor speed during night time.
2.2 ACTION 2	To open window/gap to increase natural ventilation during night time.
2.3 ACTION 3	Action 3=Action 1 + Action2
2.4 ACTION 4	To switch on fan during night time.
2.5 ACTION 5	Action 5= Action 3 + Action 4
3 TECHNICAL DATA TO REQUEST TO OWNER/MANAGER OR TO FIND DIRECTLY (MANUFACTURER DATA)	<ul style="list-style-type: none"><li>Climatic files: outside temperature in summer allowing computation of potential.</li><li>Properties of fan.</li></ul>
4 TECHNICAL OBSERVATIONS TO BE MADE ON SITE	<ul style="list-style-type: none"><li>To identify possible trajectory of air across building.</li><li>To check possibility to open windows during the night (security, orientation, protection from rain, etc.)</li></ul>

Annual fuel savings are assumed to be the result of heating needs reduction:

$$\Delta\_F = W_{FUE} * \frac{\Delta\_HN}{\eta_{FUE}}$$

Where:

$\Delta\_E_C$  is the annual savings in terms of electricity stemming from cooling demand reduction [kWh/m²/y]

$\Delta\_E_H$  is the annual savings in terms of electricity stemming from heating demand reduction [kWh/m²/y]

$\Delta\_C_N$  is the annual saving in terms of cooling needs [kWh/m²/y]

*SEER* is the Seasonal Energy Efficiency Ratio in cooling mode representative of the AC existing stock

$\Delta\_H_N$  is the annual saving in terms of heating needs [kWh/m²/y]

$\Delta\_F$  is the annual savings in terms of fuel [kWh/m²/y]

$\eta_{FUE}$  is the Seasonal efficiency in heating mode representative of the stock of fuel using equipments

$\eta_{EVE}$  is the Seasonal efficiency in heating mode representative of the stock of electricity using equipments (heat pump, resistive...)

$W_{EVE}$  and  $W_{FUE}$  are the repartition factors between electricity using equipments and fuel using equipments ( $W_R + W_B = 1$ ).

As a first approach, the seasonal efficiency for heating is assumed at 60% (fuel equipments), Seasonal efficiency (SEER) for air conditioning used is 1.5. These seasonal efficiencies are for typical system (including auxiliaries). These values can be modified according to your system.

References

[1] Keep Cool II Project, WP 4 : Assessment of energy savings related to sustainable summer comfort, Grignon-Massé L., Marchio D. et al., 2009, available on: <http://www.keep-cool.eu/>.

9 REMARKS

Although natural ventilation can be scheduled only four night-time , it is not interesting to install natural ventilation only for day-time (low cooling potential during the day, noise from outside...). Day-time ventilation is complementary to the night-time ventilation.

**5 MONITORING OF EXISTING SITUATIONS**

- To check possibility to have a higher flow rate than existing situation.
- Flow rate.
- To estimate heating capacity of building.

**6 CRITERION FOR ECO APPLICABILITY**

Parameters: integrated temperature difference (defined in section 8), thermal capacity, flow rate of supply air, comfort limit

**7 RECOMMENDATION FOR REALISATION OF ECO**

- To stop the air conditioning system (cooling and heating) when there is overventilation.
- To check possible problems of security.

**8 ADDITIONAL SUPPORT**

Definition of climatic cooling potential CCP from [1]

For the characterisation of a climate's impact on the thermal behaviour of a building, degree-days or degree-hours methods are often used. In this study, the mean climatic potential for ventilated cooling during a time period of N nights, the CCP is defined as a summation of products between building/external air temperature-difference,  $T_b - T_e$ , and time interval:

## References

[1] Climatic potential for passive cooling of buildings by night time ventilation in Europe, Artzmann et al, Applied Energy 84 (2007)

[2] Cooling-energy reduction in air-conditioned offices by using night ventilation, M. Kolokotroni et al, Applied Energy 63 (1999)

**9 REMARKS**

E3.1 UPGRADE INSULATION OF FLAT ROOFS EXTERNALLY

1 EXISTING SUBSYSTEMS ON WHICH THE ECO MAY APPLY

- Flat roof.

2 CONSIDERED ACTIONS

- To replace insulation and weatherproof film.

3 TECHNICAL DATA TO REQUEST TO OWNER/MANAGER OR TO FIND DIRECTLY (MANUFACTURER DATA)

4 TECHNICAL OBSERVATIONS TO BE MADE ON SITE

- Excessive temperature in the highest floor.

5 MONITORING OF EXISTING SITUATIONS

- Consumption of cooling equipment in the highest floor.

6 CRITERION FOR ECO APPLICABILITY

6.1 SAVINGS ESTIMATION

The estimation of the energy savings depends on the location of the building and its type (Size and glazed surface), a method has been established according to the Keep Cool II project results[1].

To estimate savings you should identify the type of buildings from the table below in which we distinguish between two typical office buildings :

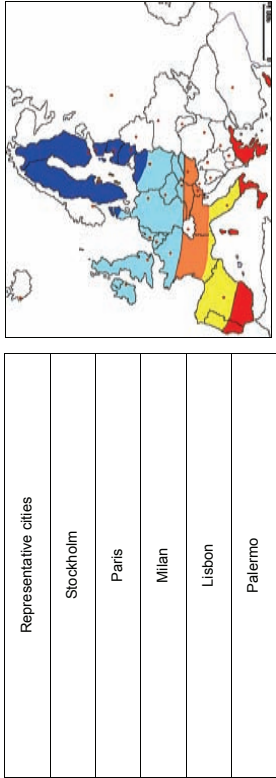
Building Types				
	Type	Number of floors	Space disposition	Air conditioned Space [% of total space]
Office 1	Large building	12	Open space	45
Office 2	Small building (Suburban)	2	Cellular	80%

The major difference between this two types is the size of the building, in this ECO the number of floor in the building is an important characteristics. Only the top floor have a roof. Therefore, the roof insulation will have less impact on energy consumption when increasing the number of floors.

After selecting the building category, you should identify the climatic area of the building in the following figure.

Regarding location, it has been decided to define several climatic areas for Europe. Each area is represented by a city.

Climatic areas



When identifying the building and the climatic area you will find in hereunder the potential savings that have been derived using TRNSYS for this 2 typical office buildings [1] according to the climatic area, (the main assumptions are given in section 8).

This ECO affects the heating and cooling demand, but also the electric demand for artificial light. There is a trade off between solar protection for HVAC and the necessity to maintain natural light.

Negative values represent increases in energy consumption.



Annual consumption and saving for Office 2:

	Heating (fuel) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (electric) [kWh/m <sup>2</sup> ]
Stockholm		
Reference-Consumption	114.8	21.5
Roof insulation-Savings	7.3	-1.9
Paris		
Reference-Consumption	61.3	24.3
Roof insulation-Savings	3.2	-2.5
Milan		
Reference-Consumption	107.5	26.5
Roof insulation-Savings	37.5	-2.3
Lisbon		
Reference-Consumption	14.2	46.3
Roof insulation-Savings	4.0	-0.7
Palermo		
Reference-Consumption	15.5	55.7
Roof insulation-Savings	8.2	1.2

Annual consumption and saving for Office 1:

	Heating (fuel) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (electric) [kWh/m <sup>2</sup> ]
Stockholm		
Reference-Consumption	143.0	24.9
Roof insulation-Savings	1.3	-0.2
Paris		
Reference-Consumption	40.3	32.1
Roof insulation-Savings	0.8	-0.2
Milan		
Reference-Consumption	55.5	46.9
Roof insulation-Savings	4.5	-0.2
Lisbon		
Reference-Consumption	7.5	75.3
Roof insulation-Savings	0.2	0.2
Palermo		
Reference-Consumption	3.8	78.4
Roof insulation-Savings	0.5	1.3

Field trials results :

According to **Greece field trials 1, 2 and 5**, the savings in AC energy use are **14% for heating** and **25% for cooling**.

7 RECOMMENDATION FOR REALISATION OF ECO

8 ADDITIONAL SUPPORT

8.1 METHOD OF CALCULATING ENERGY SAVINGS FROM [1]:

Assumptions on typical seasonal efficiencies of European heating and cooling appliances are necessary to derive annual savings in terms of final energy from savings in terms of cooling and heating needs. A distinction should be made between electricity savings and fuel savings. Regarding heating and cooling, the following equations must be used:

$$\Delta\_E\_C = \frac{\Delta\_CN}{SEER}$$



$$\Delta\_E\_H = W_{FUE} * \frac{\Delta\_HN}{\eta_{FUE}}$$

Annual fuel savings are assumed to be the result of heating needs reduction:

$$\Delta\_F = W_{FUE} * \frac{\Delta\_HN}{\eta_{FUE}}$$

Where:

$\Delta\_E\_C$  is the annual savings in terms of electricity stemming from cooling demand reduction [kWh/m<sup>2</sup>/y]

$\Delta\_E\_H$  is the annual savings in terms of electricity stemming from heating demand reduction [kWh/m<sup>2</sup>/y]

$\Delta\_CN$  is the annual saving in terms of cooling needs [kWh/m<sup>2</sup>/y]

*SEER* is the Seasonal Energy Efficiency Ratio in cooling mode representative of the AC existing stock

$\Delta\_HN$  is the annual saving in terms of heating needs [kWh/m<sup>2</sup>/y]

$\Delta\_F$  is the annual savings in terms of fuel [kWh/m<sup>2</sup>/y]

$\eta_{FUE}$  is the Seasonal efficiency in heating mode representative of the stock of fuel using equipments

$\eta_{FUE}$  is the Seasonal efficiency in heating mode representative of the stock of electricity using equipments (heat pump, resistive...)

$W_{FUE}$  and  $W_{FUE}$  are the repartition factors between electricity using equipments and fuel using equipments ( $W_R + W_B = 1$ ).

As a first approach, the seasonal efficiency for heating is assumed at 60% (fuel equipments), Seasonal efficiency (*SEER*) for air conditioning used is 1.5. These seasonal efficiencies are for typical system (including auxiliaries). These values can be modified according to your system.

References

[1] Keep Cool II Project, WP 4 : Assessment of energy savings related to sustainable summer comfort, Grignon-Massé L., Marchio D. et al., 2009, available on: <http://www.keep-cool.eu/>

9 REMARKS

E4.2 USE APPROPRIATE EXTERIOR COLOUR

1 EXISTING SUBSYSTEMS ON WHICH THE ECO MAY APPLY

Building roofs and walls.

2 CONSIDERED ACTIONS

Treat walls and roofs with special paintings to reach a higher reflectance.

3 TECHNICAL DATA TO REQUEST TO OWNER/MANAGER OR TO FIND DIRECTLY (MANUFACTURER DATA)

- You should identify absorption/ near infrared reflectance of existing colour. Use the Cool Roofing Materials Database(3) <http://eetd.lbl.gov/coolroof/> to identify solar reflectance and infrared emittance. you can also use the following table for absorption coefficient typical values:

Typical value of absorption coefficient [1]	
Surface colour type	Absorption coefficient $\alpha$
black surface	1
dark surface	0.8
red surface	0.6
light surface	0.3
reflective surface (e.g. aluminium)	0.1

Solar reflectance :  $\alpha = 1 - \alpha$

- You should identify law constraints or aesthetic limitations to use another colour.
- Existing walls insulation.

4 TECHNICAL OBSERVATIONS TO BE MADE ON SITE

5 MONITORING OF EXISTING SITUATIONS

Inputs required to use Simbench or Simaudit tool.

6 CRITERION FOR ECO APPLICABILITY

- An ideal exterior surface coating for a cooling climate would have solar reflectance near 1 (which means solar absorbance near 0) and infrared emissivity near 1 in order to radiate absorbed heat back



© Harmonac/Armines

to the sky. Buildings typically have solar reflectance in the 0.20-0.35 range, although for dark roofs reflectance can be as low as 0.05. Both walls and roofs can be treated with light colored paints or other finishes to increase reflectance to about 0.7 [2]

- If the wall is correctly insulated you should treat only roofs. Besides, the roof treatment is more important than the wall treatment, roof is more exposed to direct sunlight.

6.1 SAVINGS ESTIMATION

The estimation of the energy savings depends on the location of the building and its type (Size and glazed surface), a method has been established according to the Keep Cool II project results[2].

in this estimation we pass from a solar reflectance of walls and roofs of 0.3 to 0.7.

To estimate savings you should identify the type of buildings from the table below in which we distinguish between two typical office buildings :

Building Types

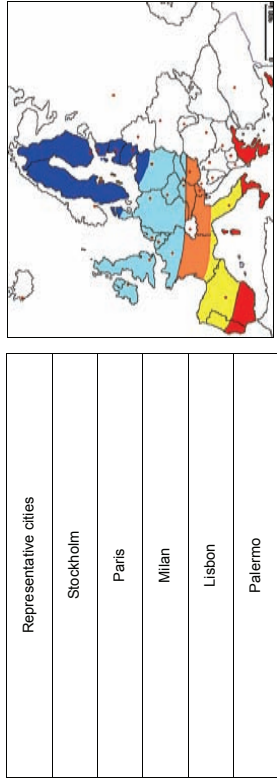
	Type	Number of floors	Floor surface [m²]	Air conditioned Space [% of total space]
Office 1	Large building	12	1250	80%
Office 2	Small building (Suburban)	2	1008	

The major difference between this two type is the size of the building.

After selecting the building category, you should identify the climatic area of the building in the following figure.

Regarding location, it has been decided to define several climatic areas for Europe. Each area is represented by a city.

Climatic areas



When identifying the building and the climatic area you will find hereunder the potential savings that have been derived using TRNSYS for this 2 typical office buildings [3] according to the climatic area, (the main assumptions are given in section 8).

This ECO affects both heating and cooling demand.



© Harmonac/Armines

Negative values are increases of energy consumption.

Annual consumption and saving values for Office 1:

	Heating (fuel) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (electric) [kWh/m <sup>2</sup> ]
Stockholm		
Reference-Consumption	143.0	24.9
Treat walls and roofs	-0.8	0.6
Paris		
Reference-Consumption	40.3	32.1
Treat walls and roofs	-1.2	1.8
Milan		
Reference-Consumption	55.5	46.9
Treat walls and roofs	-4.2	4.7
Lisbon		
Reference-Consumption	7.5	75.3
Treat walls and roofs	-1.8	6.0
Palermo		
Reference-Consumption	3.8	78.4
Treat walls and roofs	-1.7	8.3

Annual consumption and saving values for Office 2:

	Heating (fuel) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (electric) [kWh/m <sup>2</sup> ]
Stockholm		
Reference-Consumption	114.8	21.5
Treat walls and roofs	-1.2	1.2
Paris		
Reference-Consumption	61.3	24.3
Treat walls and roofs	-3.2	3.1
Milan		
Reference-Consumption	107.5	26.5
Treat walls and roofs	-10.5	7.9
Lisbon		
Reference-Consumption	14.2	46.3
Treat walls and roofs	-4.5	12.5
Palermo		
Reference-Consumption	15.5	55.7
Treat walls and roofs	-6.2	15.1

If the characteristics of the inspected building are different from the typical buildings estimated in this method, you better use the Harmonac simulation tool to estimate savings.

7 RECOMMENDATION FOR REALISATION OF ECO

If you are an HVAC consultant you can compute reduction on cooling load and electrical consumption. You could balance the price of treating the roof and the wall, and the potential for energy consumption cut. you could use Energy-plus, TRNSYS, ESP, Ecotect, IDA, Simbench, Simaudit, which are able to simulate the effects of surface radiant properties on the energy balance of the building.

8 ADDITIONAL SUPPORT

9 METHOD OF CALCULATING ENERGY SAVINGS FROM [6]:

Assumptions on typical seasonal efficiencies of European heating and cooling appliances are necessary to derive annual savings in terms of final energy from savings in terms of cooling and heating needs. A distinction



© Harmonac/Armines

should be made between electricity savings and fuel savings. Regarding heating and cooling, the following equations must be used:

$$\Delta\_E_C = \frac{\Delta\_CN}{SEER}$$

$$\Delta\_E_H = W_{EUE} * \frac{\Delta\_HN}{\eta_{EUE}}$$

Annual fuel savings are assumed to be the result of heating needs reduction:

$$\Delta\_F = W_{FUE} * \frac{\Delta\_HN}{\eta_{FUE}}$$

Where:

$\Delta\_E_C$  is the annual savings in terms of electricity stemming from cooling demand reduction [kWh/m²/y]

$\Delta\_E_H$  is the annual savings in terms of electricity stemming from heating demand reduction [kWh/m²/y]

$\Delta\_CN$  is the annual saving in terms of cooling needs [kWh/m²/y]

$SEER$  is the Seasonal Energy Efficiency Ratio in cooling mode representative of the AC existing stock

$\Delta\_HN$  is the annual saving in terms of heating needs [kWh/m²/y]

$\Delta\_F$  is the annual savings in terms of fuel [kWh/m²/y]

$\eta_{EUE}$  is the Seasonal efficiency in heating mode representative of the stock of fuel using equipments

$\eta_{FUE}$  is the Seasonal efficiency in heating mode representative of the stock of electricity using equipments (heat pump, resistive...)

$W_{EUE}$  and  $W_{FUE}$  are the repartition factors between electricity using equipments and fuel using equipments ( $W_R + W_B = 1$ ).

As a first approach, the seasonal efficiency for heating is assumed at 60% (fuel equipments). Seasonal efficiency (SEER) for air conditioning used is 1.5. These seasonal efficiencies are for typical system (including auxiliaries). These values can be modified according to your system.

References:

[1] EPA-NR Inspection protocol, Final Report 2007. <http://www.epa-nr.org/>

[2] Keep Cool II Project, WP 4 : Assessment of energy savings related to sustainable summer comfort, Grignon-Massé L., Marchio D. et al., 2009, available on: <http://www.keep-cool.eu/>

[3]Cool Roofing Materials Database (CRMD), 2001, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA. <http://eertd.lbl.gov/coolroof/>



© Harmonac/Armines

The reduction of electrical consumption is

$$\Delta P = (P_{New} - P_{Existing}) \times (t_{appliance} + \frac{t_{cool}}{COP})$$

With:

$P_{Existing}$  installed power of office equipment (W).

$P_{New}$  power of new material (W).

$t_{cool}$  the length of cooling season (h).

$t_{appliance}$  the length of office equipment use.

You will find a little software on <http://www.eu-energy-star.org/> to evaluate consumption of classical electrical equipment. A database is also available.

An analysis of appliance reduction load could be made with the Benchmark tool.

KEEP COOL [4] RESULTS METHOD:

The estimation of the energy savings depends on the location of the building and its type (Size and glazed surface), a method has been established according to the Keep Cool II project results[4].

To estimate savings you should identify the type of buildings from the table below in which we distinguish between two typical office buildings:

Building Types

	Type	Number of floors	Space disposition	Glazed areas [% of the vertical surface]	Air conditioned Space [% of total space]
Office 1	Large building	12	Open space	45	80%
Office 2	Small building (Suburban)	2	Cellular	30	

The major difference between this two types is the size of the building, but it doesn't affect strongly the savings.

After selecting the building category, you should identify the climatic area of the building in the following figure.

Regarding location, it has been decided to define several climatic areas for Europe. Each area is represented by a city.



© Harmonac/Armines

E4.# Other actions aimed at load reduction

E4.5 REPLACE ELECTRICAL EQUIPMENT WITH ENERGY STAR OR LOW CONSUMPTION TYPES

1 EXISTING SUBSYSTEMS ON WHICH THE ECO MAY APPLY

Office equipment (computers and monitors, printers, fax machines & mailing machines, scanners, copiers, ...). This ECO generates savings for office equipments electric consumption but increase heating demand and decrease cooling demand (Efficient equipments give off less heat).

2 CONSIDERED ACTIONS

To replace highest consumption material with low consumption types.

3 TECHNICAL DATA TO REQUEST TO OWNER/MANAGER OR TO FIND DIRECTLY (MANUFACTURER DATA)

- Electrical consumption / power of existing office equipment (on-mode, off-mode and standby mode).
- Estimation of the number of operating hours per week and per year for each equipment.

4 TECHNICAL OBSERVATIONS TO BE MADE ON SITE

- You could search for use time of printer, for example by using integrated copies counter.
- Length of cooling season.

5 MONITORING OF EXISTING SITUATIONS

- You could introduce a power meter on equipment plug.

6 CRITERION FOR ECO APPLICABILITY

You could estimate annual consumption and the use time of each equipment.

You could compare power of existing equipment with typical consumption of low consumption types.

To compute reduction on cooling load and electrical consumption.

A balance between the price of new material and the potential could be made.

6.1 SAVINGS ESTIMATION

CALCULATION METHOD:



© Harmonac/Armines

savings				equipments savings
Reference-Consumption	15.5	55.7	62.4	
Energy efficient	-5.0	7.3	27.6	

savings				equipments savings
Reference-Consumption	15.5	55.7	62.4	
Energy efficient	-5.0	7.3	27.6	

6.2 FIELD TRIALS RESULTS :

According to **Greece field trials 1,5,9 and 13** the savings in AC energy use are **9% for heating**, **6% for cooling**, and between **7.7% and 15% in the whole building energy use**.

7 RECOMMENDATION FOR REALISATION OF ECO

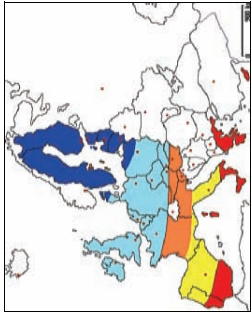
We should select a labelled energy star product, which gives a reference of low-energy consumption.

The selection of material which should be replaced, should be examined. For example, a little-used equipment can consume a lot of energy when it's used.

8 ADDITIONAL SUPPORT

Climatic areas

Representative cities
Stockholm
Paris
Milan
Lisbon
Palermo



When identifying the building and the climatic area you will find in the next page the potential savings that have been derived using TRNSYS for this 2 typical office buildings [3] according to the climatic area, (the main assumptions are given in section 8).

This ECO affects the office equipments consumption, heating and cooling demand.

Negative values represent increases in energy consumption.

Annual consumption and saving values for Office 1:

	Heating (fuel) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (electric) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Electric equipment [kWh/m <sup>2</sup> ]
Reference-Consumption	143.0	24.9	61.9
Energy efficient equipments savings	-23.0	4.7	26.8
	Paris		
Reference-Consumption	40.3	32.1	61.9
Energy efficient equipments savings	-13.8	6.7	26.8
	Milan		
Reference-Consumption	55.5	46.9	61.9
Energy efficient equipments savings	-12.8	7.1	26.8
	Lisbon		
Reference-Consumption	7.5	75.3	61.9
Energy efficient equipments savings	-4.3	8.7	26.8
	Palermo		
Reference-Consumption	3.8	78.4	61.9
Energy efficient	-2.8	9.1	26.8

Annual consumption and saving values for Office 2:

	Heating (fuel) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (electric) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Electric equipment [kWh/m <sup>2</sup> ]
Reference-Consumption	114.8	21.5	62.4
Energy efficient equipments savings	-21.8	5.0	27.6
	Paris		
Reference-Consumption	61.3	24.3	62.4
Energy efficient equipments savings	-15.2	5.9	27.6
	Milan		
Reference-Consumption	107.5	26.5	62.4
Energy efficient equipments savings	-15.0	5.1	27.6
	Lisbon		
Reference-Consumption	14.2	46.3	62.4
Energy efficient equipments	-5.3	7.7	27.6

Common loads of office equipment [2]

E4.# Other actions aimed at load reduction

## E4.6 REPLACE LIGHTING EQUIPMENT WITH LOW CONSUMPTION TYPE

### 1 EXISTING SUBSYSTEMS ON WHICH THE ECO MAY APPLY

Lighting equipment.

### 2 CONSIDERED ACTIONS

To replace high consumption lighting equipment with low consumption type. High consumption lighting equipment are mainly halogen lamp and incandescent lamp.

### 3 TECHNICAL DATA TO REQUEST TO OWNER/MANAGER OR TO FIND DIRECTLY (MANUFACTURER DATA)

- Electrical consumption and power of existing lighting equipment.
- Consumption of cooling equipments (included pump and fans) and COP.
- Occupancy schedule.

### 4 TECHNICAL OBSERVATIONS TO BE MADE ON SITE

- Individuate each lighting equipment by type and by zone (with different occupation profile) to evaluate electrical consumption.
- During the inspection it has to be noted by zone if the lighting system includes emergency lighting and or control systems with stand-by energy demands like ballasts, dimmer, transformers or similar.

### 5 MONITORING OF EXISTING SITUATIONS

- Power measurement to verify occupation profile.
- Inputs required to use Simbench or Simaudit tool.

### 6 CRITERION FOR ECO APPLICABILITY

High efficiency fixtures provided with efficient fluorescent lamps (26 mm diameter type) powered by electronic ballast. The power density in offices is reduced from 21.9 W/m<sup>2</sup> to 10.4 W/m<sup>2</sup>, while in corridors and other service areas the value is reduced from 14.8 W/m<sup>2</sup> to 7.8 W/m<sup>2</sup>.

You could estimate annual consumption and the time use of each equipment.

You could compare power of existing equipment with typical consumption of low consumption types.

### References:

[1] "Energy Audit Manual New Zealand" Energy Audit Standard, June 2007

[2] "Guide to an Energy-Smart Office", Natural resources Canada, 2005.

[3] Energystar official website, tools to evaluate potential energy and costs savings . <http://www.energvstar.org/en/>

[4] Keep Cool II Project, WP 4 : Assessment of energy savings related to sustainable summer comfort, Grignon-Massé L., Marchio D. et al., 2009, available on: <http://www.keep-cool.eu/>

### 9 REMARKS



© Harmonac/Armines



© Harmonac/Armines

Then, you can compute reduction on cooling load and electrical consumption. A balance between the price of new material and the potential could be made.

This ECO does not affect only electrical consumption for artificial lighting. It slightly affects the heating demand (increase) and the cooling demand (decrease).

Below two saving estimation methods are presented :

6.1 SAVINGS ESTIMATION 1

The reduction of electrical consumption is :

ΔP=(P<sub>New</sub>-P<sub>Existing</sub>)(tappliance+*cool*/*COP*)

With :

- P<sub>Existing</sub> installed power of office equipment (W).
- P<sub>New</sub> power of new material (W).
- *cool* the length of cooling season (h).
- *tappliance* the length of office equipment use.

You find a software on <http://www.eu-energystar.org/> to evaluate consumption of classical electrical equipment. A database is also available.

An analysis of appliance reduction load could be made too using Benchmark tool.

6.2 SAVINGS ESTIMATION 2

The estimation of the energy savings in this method depends on the location of the building and its type (Size and glazed surface). a method has been established according to the Keep Cool II project results[2]. in this estimation method you can see the variation for heating and cooling consumption.

In the table below the assumption of installed lighting power used for the savings estimation.

Office building	Office rooms	Reference Values	
	Other rooms	18 W/m²	12 W/m²
		Efficient values	
		10 W/m²	7 W/m²

To estimate savings you should identify the type of buildings from the table below in which we distinguish between two typical office buildings :

Building Types

	Type	Number of floors	Space disposition	Glazed areas [% of the vertical surface]	Air conditioned Space [% of total space]
Office 1	Large building	12	Open space	45	80%
Office 2	Small building (Suburban)	2	Cellular	30	

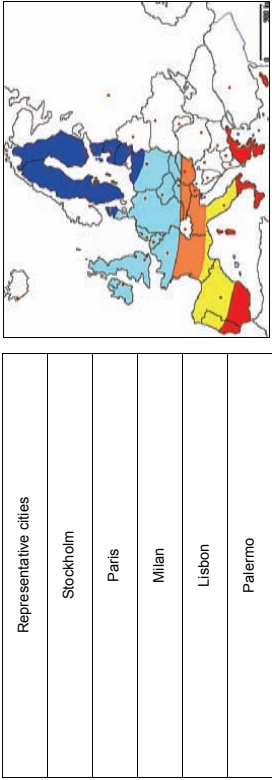


The major difference between this two type is the size of the building.

After selecting the building category, you should identify the climatic area of the building in the following figure.

Regarding location, it has been decided to define several climatic areas for Europe. Each area is represented by a city.

Climatic areas



When identifying the building and the climatic area you will find hereunder the potential savings that have been derived using TRNSYS for this 2 typical office buildings [2] according to the climatic area, (the main assumptions are given in section 8.1).

Negative values represent increases in energy consumption

Saving values for Office 1:

	Heating (fuel) [kWh/m²]	Cooling (electric) [kWh/m²]	Lighting (electric) [kWh/m²]
Stockholm			
Reference Consumption	143.0	24.9	22.2
Efficient lighting savings	-10.8	0.5	9.3
Paris			
Reference Consumption	40.3	32.1	19.5
Efficient lighting savings	-6.0	1.2	8.1
Milan			
Reference Consumption	55.5	46.9	18.5
Efficient lighting savings	-5.3	1.2	7.7
Lisbon			
Reference Consumption	7.5	75.3	17.6
Efficient lighting savings	-2.2	1.5	7.3
Palermo			
Reference Consumption	3.8	78.4	17.8
Efficient lighting savings	-1.2	1.9	7.4

Saving values for Office 2:

	Heating (fuel) [kWh/m²]	Cooling (electric) [kWh/m²]	Lighting (electric) [kWh/m²]
Stockholm			
Reference Consumption	114.8	21.5	36.5
Efficient lighting savings	-15.3	1.5	15.5
Paris			
Reference Consumption	61.3	24.3	34.4
Efficient lighting savings	-10.7	2.1	14.6
Milan			
Reference Consumption	107.5	26.5	32
Efficient lighting savings	-9.0	1.5	13.5
Lisbon			
Reference Consumption	14.2	46.3	27.2
Efficient lighting savings	1.8	11.4	13.2
Palermo			
Reference Consumption	15.5	55.7	27.7
Efficient lighting savings	-2.7	2.1	11.7





$$\Delta_{-}F = W_{FUE} * \frac{\Delta_{-}HN}{\eta_{FUE}}$$

Where:

$\Delta_{-}E_C$  is the annual savings in terms of electricity stemming from cooling demand reduction [kWh/m<sup>2</sup>/y]

$\Delta_{-}E_H$  is the annual savings in terms of electricity stemming from heating demand reduction [kWh/m<sup>2</sup>/y]

$\Delta_{-}CN$  is the annual saving in terms of cooling needs [kWh/m<sup>2</sup>/y]

*SEER* is the Seasonal Energy Efficiency Ratio in cooling mode representative of the AC existing stock

$\Delta_{-}HN$  is the annual saving in terms of heating needs [kWh/m<sup>2</sup>/y]

$\Delta_{-}F$  is the annual savings in terms of fuel [kWh/m<sup>2</sup>/y]

$\eta_{FUE}$  is the Seasonal efficiency in heating mode representative of the stock of fuel using equipments

$\eta_{HE}$  is the Seasonal efficiency in heating mode representative of the stock of electricity using equipments (heat pump, resistive...)

$W_{FUE}$  and  $W_{HE}$  are the repartition factors between electricity using equipments and fuel using equipments ( $W_R + W_B = 1$ ).

As a first approach, the seasonal efficiency for heating is assumed at 60% (fuel equipments). Seasonal efficiency (SEER) for air conditioning used is 1.5. These seasonal efficiencies are for typical system (including auxiliaries). These values can be modified according to your system.

#### References

[1] Verification of electrical energy savings for lighting retrofits using short- and long-term monitoring, Alex H.W. Lee (2000)

[2] Keep Cool II Project, WP 4 : Assessment of energy savings related to sustainable summer comfort, Grignon-Mass  L., Marchio D. et al., 2009, <http://www.keep-cool.eu/>

[3] Final report, June 2007, inspection protocol EPA-NR, <http://www.epa-nr.org/>

[4] EN 12464-1:Lighting of work places Part 1: Indoor work places, June 2003

#### 9 REMARKS

Connections with ECOS on daylight sensors, shading/lighting may be introduced.

HARMONAC

#### 7 RECOMMENDATION FOR REALISATION OF ECO

The lighting devices should be selected with a high luminous efficiency (lumen/watt).

Economic savings will be higher for lighting equipments with a large number of operating hours that should be changed in priority.

#### 8 ADDITIONAL SUPPORT

A method to validate the savings is proposed in [1]

To evaluate the installed lighting power you can use the national standards. The followings values are given for French office [3]:

room/zone	incandescence and halogen	installed power W/m <sup>2</sup>	fluorescent standard	fluorescent improved
office (less than 30 m <sup>2</sup> ), meeting room, computing room, library (500 lx)	80	25	25	18
open space office (500 lx)	65	20	20	15
toilet (250 lx)	65	20	20	19
corridor (200 lx)	40	15	15	9
reception space (300 lx)	60	15	15	12
stockage (150 lx)	18	8	8	6
drawing room (1000 lx)	160	40	40	30
laboratory (750 lx)	120	40	40	27
kitchen (500 lx)	80	25	25	20
restaurant or canteen (300 lx)	60	18	18	13

The European standard **EN 12464-1** [4], specifies the requirements for the quantity and quality of lighting systems used in the majority of indoor work places and similar areas. It also takes into consideration visual comfort and performance requirements in the work place.

#### 8.1 METHOD OF CALCULATING ENERGY SAVINGS FROM [2]

Assumptions on typical seasonal efficiencies of European heating and cooling appliances are necessary to derive annual savings in terms of final energy from savings in terms of cooling and heating needs. A distinction should be made between electricity savings and fuel savings. Regarding heating and cooling, the following equations must be used:

$$\Delta_{-}E_C = \frac{\Delta_{-}CN}{SEER}$$

$$\Delta_{-}E_H = W_{FUE} * \frac{\Delta_{-}HN}{\eta_{FUE}}$$

Annual fuel savings are assumed to be the result of heating needs reduction:

HARMONAC



## P1.3 MODIFY CONTROLS IN ORDER TO SEQUENCE HEATING AND COOLING

### 1 EXISTING SUBSYSTEMS ON WHICH THE ECO MAY APPLY

- System that oscillates between heating and cooling (Lack of efficient control strategy and/or sensors).
- Local control of heating and cooling distribution (zone temperature control)
- Water-Based system, Air and water based system.

### 2 CONSIDERED ACTIONS

- To identify possible problem of interaction between heating and cooling.
- To install / calibrate / replace an external temperature and relative humidity sensors.
- To install / replace central controller in order to control new possibilities of sequences.

### 3 TECHNICAL DATA TO REQUEST TO OWNER/MANAGER OR TO FIND DIRECTLY (MANUFACTURER DATA)

- To identify controller manufacturer and search for controller user's guide for heating and cooling control.
- To identify sensors manufacturer and search for sensors user's guides.
- To identify sensors and controllers locations in the building and controlled areas.

### 4 TECHNICAL OBSERVATIONS TO BE MADE ON SITE

- Description of water loop architecture.
- You could consider temperature set points (and possible problems of measurement) and hourly outside temperature to identify interactions of cooling/heating.

### 5 MONITORING OF EXISTING SITUATIONS

- Consumption of heating and cooling equipment in each air-conditioned room.
- Consumption of HVAC system.
- External conditions (temperature and relative humidity).
- Room conditions (temperature and relative humidity).

## 6 CRITERION FOR ECO APPLICABILITY

### 6.1 DEAD-BAND PROBLEM

The purpose of a dead-band thermostat is to insert a range of temperature between heating and cooling in which no conditioning occurs.

A dead-band thermostat is essentially two independent thermostats. One thermostat controls heating and the other controls cooling. There are several different versions of dual-element thermostats. The most common type of dead-band has a single temperature setting, the occupant cannot control the dead-band interval. Another type has a separate temperature settings for heating and cooling, the dead-band can be controlled by adjusting heating and cooling temperature set points.

If the heating and cooling temperatures are set close together, small defects or incorrect adjustments in the control system can cause simultaneous heating and cooling. The dead-band (see 1 on figure 1) will disappear. Figure 2 shows a problem of cool and heat supply sequencing in the AHU.

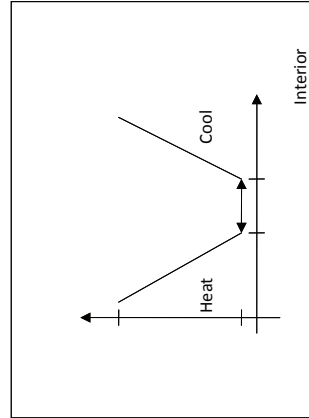


Figure 1: there is a sufficient dead-band.

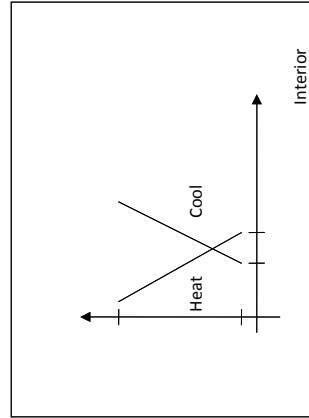


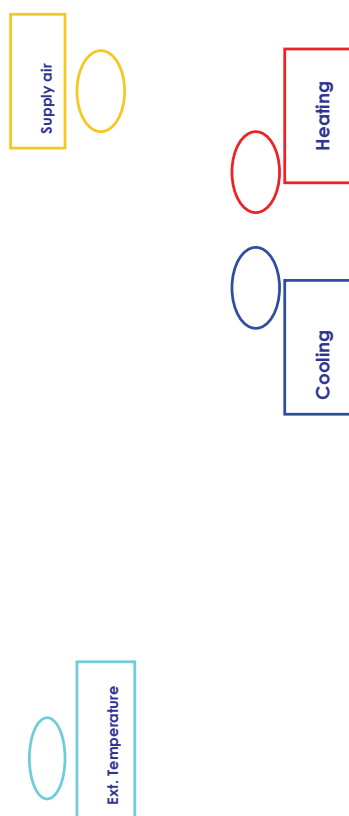
Figure 2: There is not a dead-b

## 6.2 LACK OF EFFICIENT CONTROL STRATEGY

Simultaneous cooling and heating can be necessary when the relative humidity is above the set point. In this case it is necessary to cool down the air to remove moisture and heat it thereafter to reach the desired temperature with the desired relative humidity.

But in some cases, simultaneous cooling and heating can be caused by a control problem. The system doesn't necessarily consider the right measure and/or the proper set point of relative humidity. In the worst case the system doesn't take into account the RH.

For example, while external conditions (Temperature and RH) are not satisfactory to dehumidify in the Italy Field Trials 1, you can see that the electric chiller cools the air from 18°C to 14°C (35.5 kWh), then the gas boiler heats it from 14°C to 19°C (36.8 kWh).



The sequencing problem is caused by two main reasons :

1. Lack of external RH sensor.
2. Lack a logic function that shut off chillers (and close the cold deck of the AHU) when external Temperature is below the set point temperature of supply air.

To fix it, we add an RH sensor and stop pre-cooling if the RH is lower than 50% (See 6.4 for estimation of savings in this case study).

## 6.3 DETECTION OF SIMULTANEOUS HEATING AND COOLING

To detect simultaneous heating and cooling, compare the chiller consumption in the cooling season (summer), where it is largely used, with the heating season or the whole year consumption, then you will have the **consumption ratio : (heating season / cooling season) or (whole year/cooling season)**.

You can also compare the cooling consumption in the winter with the theoretical needs in this season.

For example, in **the Italy field trials-1** we illustrate the application of this method :

Despite of the high potential performance of system components (variable flow pumps and fans, active chilled beams, active ventilated facade with solar irradiance control) it presents relative high specific consumption:

- Chiller+cool pumps+evaporative towers : 38.16 kWh/m<sup>2</sup> for the year.
- Chiller+cool pumps+evaporative towers : 20 kWh/m<sup>2</sup> for summer season.

Those values indicate that the cooling system has a huge consumption on the whole year, almost twice of the summer consumption. That seems not normal: Aosta is situated in climatic zone E of Italy (2800 degree days heating).

An inspection of the HVAC system, conducted in January 2008, revealed that chiller was in operation also during winter. Exhaust air of AHU's is supplied to terminal units at 19°C 50% RH neutral air: it was unclear that we needed air cooling while external conditions were below (Temperature and Relative Humidity) supply conditions. **A simultaneous heating and cooling was detected.**

## 6.4 METHOD FOR ESTIMATING SAVINGS

To estimate annual savings after setting correctly the heating and cooling sequence, A simple method can be applied to estimate energy savings. From the measured consumptions, select and add, those whose external conditions (RH and temperature) do not require cooling.

We present hereunder an application of the proposed estimation method on the Italy Field Trials 1 :

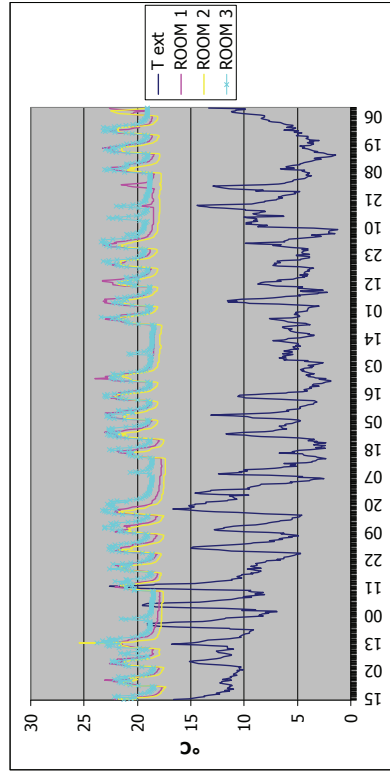
An evaluation of this ECO was possible with medium term measurements, conducted from January to May 2009 in Italy Field Trials 1. Monitoring data used for this purpose are the data described in section 5.

From hourly consumption, the operation hours when external conditions was below 18°C and 50% Relative Humidity were selected.

2009 HVAC Consumption (Chillers + pumps+ev. tower)				
I	01 Jan-27 Mar	22989	kWh	
II	27 Mar-11 May	12349	kWh	
III	11 May-15 June	14236	kWh	
IV	15 June-15 sept	70090	kWh	
Total		119664	kWh	

that in “heavy” surgeries the system does not achieve temperature control.

The graphs shown below demonstrate that users complaints was well addressed: despite the chillers works without interruption (at 25% load) the rooms temperature increase dramatically during surgeries. The ideal temperature for surgery room is 18°C, in some cases this temperature reach 25°C.



For this case we can use the same simple method, as in the previous case, to estimate savings. indeed, from hourly consumption was selected the operation hours when external conditions was below 14°C and 50% Relative Humidity. Internal load of surgery rooms in some cases require cooling power, also in winter, for this reason we assumed a reasonable minimum temperature (14°C).

Chillers Consumption (22 Dec 2008 - 18 Jan 2009)
7979 kWh
Chiller room consumption when T<14°C & RH<50%
4879 kWh



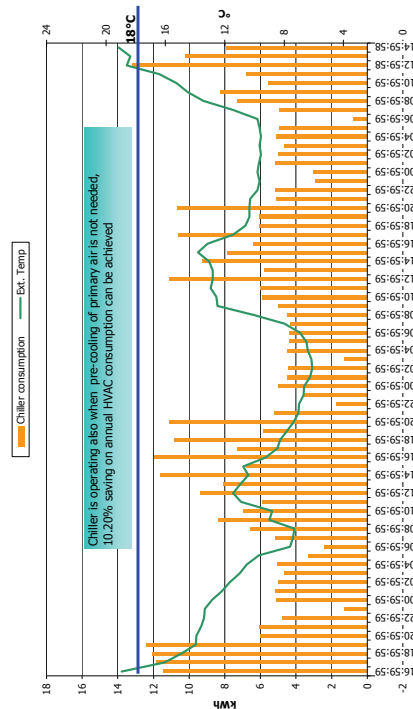
HVAC system consumption when T<18°C & RH<50%				
I	01 Jan-27 Mar	9503.653 kWh	41.34%	on Jan-Mar consumption
II	27 Mar-11 May	2706.199 kWh	21.91%	on april-may consumption
Total		12209.85 kWh	10.20%	on annual consumption of HVAC
			34.55%	on Jan-May consumption of HVAC

These values allow to estimate savings, if an external humidity and temperature sensors were installed and well calibrated.

If the accurate values of external temperature and RH were used to control the chiller equipment (shut off when T and RH are below supply conditions) the saving on January-May consumption of HVAC system would be:

- 34,55% on Jan-May HVAC consumption.
- 10.2% on annual consumption.

POLITO FT-FIN Chiller hourly consumption VS Temperature (23-26 March 2009)



If we look at the **Italy Field Trial 5** where the considered system is an “all-air” serving 3 surgery rooms. The air flow for surgery rooms is 15 exchange/hour, with no recirculation. Some user feedbacks indicate



P1.# BEMs and control / Miscellaneous

P1.4 MODIFY CONTROLS IN ORDER TO ADJUST INTERNAL SET POINT VALUES TO EXTERNAL CLIMATIC CONDITION

1 EXISTING SUBSYSTEMS ON WHICH THE ECO MAY APPLY

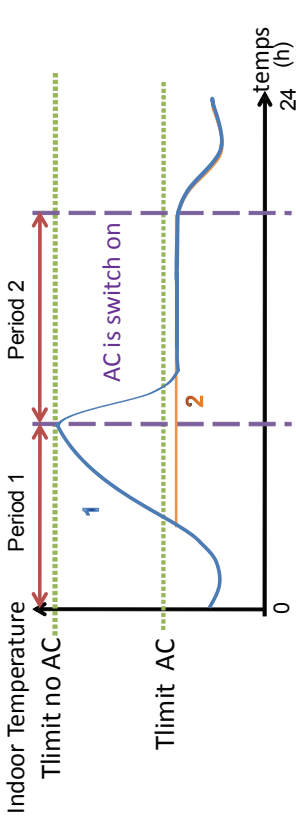
- All local control system

2 CONSIDERED ACTION

You could consider having a variable set point in summer conditions that would avoid discomfort situation (adaptive comfort).

For example, a daily temperature limit (Tlimit no AC) can be defined to delay air conditioning start.

In the following figure, the blue curve (1) shows the evolution of an adaptive control strategy: in the period one, the AC system remains off until the period 2 when the indoor temperature reached the daily temperature limit (Tlimit no AC), the AC system is switch on and the indoor temperature drops to Tlimit AC. The orange curve (2) shows the evolution of indoor temperature when the AC system remains on at a setpoint below Tlimit AC.



3 TECHNICAL DATA TO REQUEST TO OWNER/MANAGER OR TO FIND DIRECTLY (MANUFACTURER DATA)

- Possibility to open the windows
- Automatic switch off of AC system when the windows are opened
- Access of occupant to windows



Those values permit to estimate savings, if an external humidity sensor is installed. If the values of external temperature and RH was used to control the chiller equipment (shut off when T and RH are below supply conditions) the saving on Dec-Jan consumption of HVAC system would be:

- 61.15% on Dec-Jan chiller consumption

The annual value is not available, but, by former experience in relatively cool climatic conditions, it is reasonable a yearly saving of 8-15% on chillers consumption.

7 RECOMMENDATION FOR REALISATION OF ECO

You could stop auxiliaries (ECO 02.3) according to new improvement.

You should train considered operators to have an energy-efficient O&M activities (ECO 01.3).

8 ADDITIONAL SUPPORT

9 REMARKS

The annual value is underestimated (section 6.2), because the analysis does not consider the summer season due to less frequent external conditions below 18°C and 50% RH



4 TECHNICAL OBSERVATIONS TO BE MADE ON SITE

5 MONITORING OF EXISTING SITUATIONS

6 CRITERION FOR ECO APPLICABILITY

In order to applied this kind of control strategy, it is required that

- The occupants can operate the windows
- Each occupant has an access to a window
- Each AC unit is automatically switch off when the windows are opened

A dynamic simulation can be done to estimate the potential energy savings.

The daily temperature limits could be defined according to adaptive temperature limits of [EN 15251] of naturally ventilated building and Tlimit AC can be chosen lower than temperature limits of [EN 15251] AC buildings.

Others limits can be used by using a daily indoor temperature set point which should be lower than Tc defined by the following equation [Nicol]:

$$T_e = 0.09 \theta_{avg} + 22.6 \text{ if } \theta_{avg} \geq 10^{\circ}\text{C}$$
$$T_e = 23.5 \text{ if } \theta_{avg} < 10^{\circ}\text{C}$$

With  $\theta_{avg}$  the moving daily average temperature of day D, is calculated from daily average temperature of day D-1 ( $\theta_{D-1}$ ) and from the moving daily average temperature of a day D-1 ( $\theta_{D-1}$ ) using the following equation:

$$\theta_{avg} = 0.9 \theta_{D-1} + 0.1 \theta_{D-1}$$

For example a simulation was done to estimate the potential savings of a strategy named realistic behaviour, considering that air temperature set point is fixed at 26.5°C for occupancy hours left when comfort limit for category III of EN 15251 building is not achieved. A set point of 35°C is then applied at the end of occupancy hours. This strategy would represent the behaviour of occupants when they are too hot in an air conditioned building. A second strategy named thermostat 26.5°C, was simulated considering a fixed set point of 26.5°C during occupancy hours.

The climatic condition of Liege (Belgium) and a small office building representative of the French stock were used. Further detail can be found in [Cailliet]

The following table shows the results of this study extracted from [Cailliet].



Discomfort hours summer	Thermostat 26.5°C	Realistic behaviour
Degres hours summer	229	278
Mean discomfort summer °C	57.1	77.0
Cooling load kWh	0.2	0.3
	25470	23649

The use of a realistic behaviour, in this example, reduced the cooling load by 7%. Globally, the indoor thermal comfort is respected.

Greece Field Trials results:

According to **Greece field trials 3,4,6,8,12 and 14** savings in AC energy use are **21% for heating and 6% for cooling**. For the **whole building energy use** the savings are **between 7.7% and 16.8%**.

7 RECOMMENDATION FOR REALISATION OF ECO

8 ADDITIONAL SUPPORT

[EN 15251] EN 15251, 2007, Critères d'ambiance intérieure pour la conception et évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité d'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique.

[Nicol] Maximum temperatures in European office buildings to avoid heat discomfort, F. Nicol, M. Humphreys, Solar Energy 81 (2007) 295-304

[Cailliet09] Simulation of Control Options for HVAC Management of a Typical Office Building, J. Cailliet, J. Adnot, P. Rivière, in proceedings of Climamed'09 Lisboa.



P2.# Cooling equipment /Free Cooling

P2.3 SPLIT THE LOAD AMONG VARIOUS CHILLER

You could examine layout of chilled-water (ECO P2.4) before to control it (ECO P2.3)

1 EXISTING SUBSYSTEMS ON WHICH THE ECO MAY APPLY

- Air-water based system
- All water based system

These subsystems distribute poorly the load.

You could consider also if:

- Chillers are in parallel with identical design, COPs and part load characteristics: subsystem 1

- Different chillers are in parallel: subsystem 2



- Chillers are in series with identical design, COPs and part load characteristics: subsystem 3.
- Different chillers are in series: subsystem 4

2 CONSIDERED ACTIONS

To sequence chiller to have a better overall efficiency

3 TECHNICAL DATA TO REQUEST TO OWNER/MANAGER OR TO FIND DIRECTLY (MANUFACTURER DATA)

- Total chiller load  $\dot{Q}_{load}$
- Cooling capacity of each chiller  $\dot{Q}_{desi}$

4 TECHNICAL OBSERVATIONS TO BE MADE ON SITE

Description of water loop architecture

5 MONITORING OF EXISTING SITUATIONS

Power consumption of each chiller as a function of the leaving condenser water temperature and the chilled-water supply temperature.

6 CRITERION FOR ECO APPLICABILITY

6.1 CRITERIA FOR CHILLERS IN PARALLEL WITH IDENTICAL DESIGN, COPS AND PART LOAD CHARACTERISTICS (SUBSYSTEM 1)

$$\dot{Q}_{opti} = \frac{\dot{Q}_{load}}{N} - \dot{Q}_{desi}$$

Where  $\dot{Q}_{opti}$  is optimal loading of chiller i;  $\dot{Q}_{load}$  is total chiller load;  $\dot{Q}_{desi}$  is the cooling capacity of i<sup>th</sup> chiller at design conditions and N is the number of chillers operating.

The loading determine with previous equation gives a minimum of power consumption when the chillers are operating at loads greater than the point at which the maximum COP occurs.

6.2 CRITERIA FOR DIFFERENT CHILLERS IN PARALLEL (SUBSYSTEM 2) (WILL BE STUDIED)

You consider two type of control:

- To use individual chilled-water flow rate control (using a two-way valve) at equal chilled-water set points.



- To use different chilled-water set point

## 7 RECOMMENDATION FOR REALISATION OF ECO

- Realisation for chillers in parallel with identical design, COPs and part load characteristics (subsystem 1)
- You could control individual chilled-water flow rate to achieve these load distribution

## 8 ADDITIONAL SUPPORT

### References

ASHRAE Handbook-HVAC applications, 2007, 41.21 to 41.25

## 9 REMARKS



P2.# Cooling equipment /Free Cooling

## P2.6 REPLACE OR UPGRADE COOLING EQUIPMENT AND HEAT PUMP

### 1 EXISTING SUBSYSTEMS ON WHICH THE ECO MAY APPLY

- Air-water based system
- All water based system
- Single staged compressor
- Staged compressor

### 2 CONSIDERED ACTIONS

- To replace inefficient equipment with new efficient type
- To replace existing oversized cooling equipment/heat pump
- To upgrade cooling equipment/heat pump

### 3 TECHNICAL DATA TO REQUEST TO OWNER/MANAGER OR TO FIND DIRECTLY (MANUFACTURER DATA)

- COP, EER, ESEER, IPLV.
- Nominal electrical power of each equipment.
- Cooling capacity (kW) of each equipment.
- Net outside gross area (N.O.G.A.) (m<sup>2</sup>) and surface of conditioned area (m<sup>2</sup>)
- Annual electric consumption of each equipment.

For example, in the **Austrian Case Study 1** concerns the cold water generator of the building and according to the Eurovent database the Chiller DAIKIN EWW 240 has an EER class D.

EER: 4.04

SEER: 4.73

Nominal cooling capacity: 249 kW

### 4 TECHNICAL OBSERVATIONS TO BE MADE ON SITE



estimate energy savings generated through the scaling of the chiller by simulating and comparing the existing and the new size.

The graph below shows the hottest day of the summer 2009 in Vienna.

The chiller works below 60 % of its nominal electric power in the afternoon (< 35kW). The working hours on this day have been 14h according to the above graph.

By measuring the maximum electric load and dividing it by the nominal electric power of existing chiller (61.4 kW), we deduce that the cold water generator is oversized by the factor 1,75.

SimAudit estimates the chiller consumption:

- 14.644 kWh with oversize factor 1.75 (existing chiller)
- 12.443 kWh with oversize factor 1.0 (New chiller with same EER)

Simulation in SimAudit shows that resizing the chiller to its actual needs without changing its EER class will decrease the energy consumption by 15%.

This will result in a lowered energy consumption of 3,186 kWh and will save about 564 kg CO<sub>2</sub> per year.

### 6.3 REPLACEMENT COST [8]

#### Chiller cost (From 100 to 1000 kW)

Usually the chiller cost is a function of capacity P (in KW). For the chiller as well as for the other components, a linear function like **Cost=a+bxP** can be assumed. here we consider only public prices including a commercial margin (typically 20%) but not the installation margin which has to be add later. Costs have been calculated based on various source, namely journals, various manufacturers directories, interviews with manufacturers and installers, various internal reports, etc. They may differ by 10% from one country to another (Greece and Spain being for example less "expensive", despite of the free circulation of products)

the following table present reference cost of basic chillers and heat rejection equipment



- You could examine non-symmetric condenser dirtying as an indication of partial load functioning (see page 118 [2])

### 5 MONITORING OF EXISTING SITUATIONS

- Number of operating hours of each equipment (or overall cooling production of each equipment)
- Hourly electrical consumption and hourly cooling production of each equipment.
- The electrical power has to be measured when energy demand for cooling is the highest.

The measurement in the **Austrian case study 1** during the cooling period from April to October confirms the observations that also have shown that the operating mode of the chiller is below 50% almost during the whole cooling period. It therefore shows that the chiller is too big for the cooling load in the building.

### 6 CRITERION FOR ECO APPLICABILITY

- You could compare existing COP and EER to Eurovent reference values then you could evaluate ESEER to approximate energy savings
- You could compare basic design and mean cooling capacity practice (see section 8.1). This comparison could be made with taking account difference between N.O.G.A and conditioned surface.
- You could examine electrical power of each chiller (or all chillers) as a function of operating time (as % of cooling time) and then to compare to nominal electrical power. This comparison should be made during a typical period to avoid drawing bad conclusion (e.g. scorching heat period).

#### 6.1 UPGRADING THE EFFICIENCY OF THE CHILLER IN THE AUSTRIAN CASE STUDY 1

The chiller of the Austrian case study is only 2 years old, it has an EER class which is in the lowest quarter compared to the other chillers in this power class (200 – 250 kW). The SEER is even lower, it is the second lowest in the Eurovent database compared to the other models in this class.

The chiller can be replaced with one of the most efficient chillers in the Eurovent database: climaveneta TEC5-HF1A1 which has an EER class A.

EER: 5,33

SEER: 9,27

Nominal cooling capacity: 226 kW

This means that the consumption according to the SEER will be lowered by 49%. This will result in a lowered energy consumption of 10,410 kWh and will save about 1,842 kg CO<sub>2</sub> per year.

#### 6.2 REDUCING CHILLER POWER IN THE AUSTRIAN CASE STUDY

The method is a comparison between the measured chiller power on days when energy demand for cooling is the highest and manufacturer's data in order to detect and estimate the oversize. Then using SimAudit, you can





A/C systems type	Source: EDF		State of art	
	Activity sector	Installed cooling power W/m² N.O.G.A	Installed cooling power W/m² N.O.G.A	sample/minimum/maximum
Multi split	Offices	70		-
Multi split VRF	commercial buildings	100		-
	Offices	80	80	5/37/137
Fan coil units	Offices	100	100	4/76/133
Fan coil units	Hotels	70		-
Chilled ceiling/Chilled beams	-	-	75	6/50/127
AHU	-	-	95	6/28/173
Roof top	Industrial building	100	125	4/72/198

You can use the following table to estimate the thermal load, and with multiplying by k (k=0.5 for centralised systems and k=0.78 for individual systems) estimate the total electric power

Note that this method doesn't take in consideration neither the building envelope nor the climate.

Office	Activity of building		Thermal load W/m²
	mean		125
	inside area (1)		70
	peripheral area (<60% glazed area) (2)		120
	peripheral area (<65% glazed area) (2)		180
	Bank		180
	Computer		400
	Hotel		150-300
	Restaurant		220
	Commercial		140

This table is extracted from [7]

(1)i.e. exterior wall more than 7m

(2)i.e. exterior wall less than 6m



Tuype	a (Euros)	b(Euro/kW)
Air cooled non reversible non-ducted, basic screw or scroll chiller	8000	100
Air cooled reversible, basic screw or scroll chiller	8000	110
Water cooled, tower included, scroll, basic chiller	8000	120
Groundwater cooled , scroll chiller	12000	270
Centrifugal chiller, over 700 kW	8000	100

For other system type you can use the following table :

Type	Purchasing Cost [€/kWc]	Installation cost [€/kWc]
VRF	400	100
Large Splits	400	100
Large Air Packages (RT...) with distribution	300	200
Split	300	40
Multi Split	300	100
RAC-Packaged (Air cooled)	240	80
RAC-Packaged (Water cooled)	140	20
Single Duct	400	25

7 RECOMMENDATION FOR REALISATION OF ECO

If (3) shows “big” difference, you may examine load splitting (ECO P2.3), or improve refrigeration control (ECO P2.5)

After compressor change, you could also change temperature set point/pressure to optimise heat exchange of condenser / evaporator (ECO O3.7 O3.8 O3.9).

8 ADDITIONAL SUPPORT

8.1 MEAN COOLING CAPACITY PER M² OF N.O.G.A (NET OUTSIDE GROSS AREA) [2].



If the product isn't certified, default values are provided in [6] :

8.2 EUROVENT CHILLER CLASSIFICATION [1]

8.3 SEER CALCULATION METHOD [1]:

SEER is calculated as follow:



SEER = A.EER100% + B.EER75% + C.EER50% + D.EER25%  
With the following weighting coefficients:

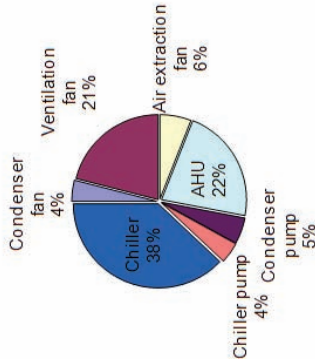
A = 0.03  
B = 0.33  
C = 0.41  
D = 0.23

Table of Part Load conditions below air cooled and water cooled units.

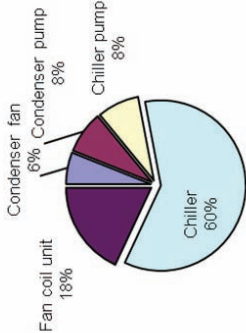
[1]

Then you could estimate each equipment consumption using the following distribution[4].

Centralised system (AHU)



Local air conditioning



You could also estimate part of auxiliaries equipment using distribution in [5].

References:



[1] Eurovent website : <http://www.eurovent-certification.com/>  
[2] Report: Réalisation d'un benchmarking sur le terrain des méthodes d'inspection et d'audit de la climatisation, Adnot et al.  
[3] BSRIA guide-Rules of thumb-Guidelines for building services, 2003, K Pennycook  
[4] Fan and demand energy: three air distribution systems, ASHRAE journal vol. 42 n°6 June 2000  
[5] EECAC final report, 2003, Adnot et al.  
[6] Technical guides for owners/managers of air conditioning systems volume6, Auditac project, How to benefit from the Eurovent certification database and to retrieve past equipment data in the audit process.  
[7] K. Pennycook, A BSRIA guide – Rules of thumb – Guidelines for building services, UK 4<sup>th</sup> edition, The Chameleon Press Ltd.

9 REMARKS

The hottest day is not always the day with the maximum electrical power demand for cooling, other external factors influence cooling demand. For example: the occupation of the offices during vacation can reduce demand.

In that case, a detail thermal study should be done to evaluate precisely the cooling demand.



P3.# Air Handling/Heat recovery/Air distribution

### P3.3 USE THE BEST EFFICIENT FANS

#### 1 EXISTING SUBSYSTEMS ON WHICH THE ECO MAY APPLY

- Fans driven by motors with an electric input power between 125 W and 500 kW.
- Axial fan, Centrifugal fan, cross flow fan or mixed flow fan.

#### 2 CONSIDERED ACTION

To replace fans by the most energy efficient fans.

#### 3 TECHNICAL DATA TO REQUEST TO OWNER/MANAGER OR TO FIND DIRECTLY (MANUFACTURER DATA)

- Fan type
- You could search for fan's efficiency as a function of total or static pressure and flow rate curve.

#### 4 TECHNICAL OBSERVATIONS TO BE ON SITE

- 

#### 5 MONITORING OF EXISTING SITUATIONS

- Fan electrical power (kW).
- Running time of fans (t (h)).

#### 6 CRITERION FOR ECO APPLICABILITY

##### 6.1 SAVINGS ESTIMATION

The energy savings are estimated using the following equation:


$$E_{\text{Energy savings}} [kWh] = t \cdot P \left( 1 - \frac{\eta_{\text{old}}}{\eta_{\text{new}}} \right)$$

Where:

$\eta_{\text{new}}$  Energy efficiency of the new fan (from Section 5.2).

$\eta_{\text{old}}$  Actual Fan efficiency (if unknown then use the table on section 7).

t Running time of fans from monitoring existing situation [hour].

 Fan electrical power [kW].

After estimating savings by choosing the best efficient equipment according the **Directive 2009/125/EC**(1) (Section 5.2) the criterion is now to compare the economic benefits of this replacement.

You can then compare the investment in new fans with economic savings generated from electric savings.

#### 6.2 EFFICIENCY REQUIREMENTS ACCORDING TO THE DIRECTIVE 2009/125/EC(1)

This Regulation establishes ecodesign requirements for the placing on the market or putting into service of fans driven or designed to be driven by motors with an electric input power attributable to the fan at its optimum energy efficiency point of between 125 W and 500 kW.

The minimum energy efficiency requirements for fans according to the quoted directive are set out in Tables 1 and 2. This energy efficiencies correspond to the  $\eta_{\text{new}}$  for calculation of energy savings.

Several definitions are presented below and useful for reading the tables.

Definitions :

- Measurement category** : means a test, measurement or usage arrangement that defines the inlet and outlet conditions of the fan under test;
- Measurement category A**: means an arrangement where the fan is measured with free inlet and outlet conditions;
- Measurement category B**: means an arrangement where the fan is measured with free inlet and with a duct fitted to its outlet;
- Measurement category C**: means an arrangement where the fan is measured with a duct fitted to its inlet and with free outlet conditions;
- Measurement category D**: means an arrangement where the fan is measured with a duct fitted to its inlet and outlet;
- Efficiency category**: means the fan air output energy form used to determine the fan energy efficiency, either static efficiency or total efficiency, where;
  - Fan static pressure**: ( $p_s$ ) has been used to determine fan air power in the efficiency equation for fan static efficiency, and
  - Fan total pressure**: ( $p_t$ ) has been used to determine fan air power in the efficiency equation for total efficiency;
- Efficiency grade**: is a parameter in the calculation of the target energy efficiency of a fan of specific electric input power at its optimum energy efficiency point (expressed as parameter 'N' in the calculation of the fan energy efficiency);

To extract  $\eta_{\text{new}}$ , you start by selecting the lines with the appropriate fan type (Column: "Fan types"), which was requested from the owner, or found from manufacturer data).

Then you select the lines with a measurement category similar to the one used to determine the actual fan energy efficiency (to ensure that old and new efficiency are comparable).

Finally you select the line with the actual range of power, extract the correspondent expression and replace "p" by the actual power of the fan and "N" by the efficiency grade from the last column of the tables.

For example if the actual fan is an axial fan and have a power of 35 kW with a static efficiency category :

$$\eta_{fan,static} = 2,74 \cdot \ln(P) - 1,88 + N$$

With P=35 and N=56 :

$$\eta_{fan,static} = 56,89 \%$$

**Table 1. First tier minimum energy efficiency requirements for fans from 1 July 2012**

Fan types	Measurement category (A-D)	Efficiency category (static or total)	Power range P in kW	Target energy efficiency	Efficiency grade
Axial fan	A, C	static	$0,125 \leq P \leq 10$	$\eta_{target} = 2,74 \cdot \ln(P) - 6,33 + N$	36
			$10 < P \leq 500$	$\eta_{target} = 0,78 \cdot \ln(P) - 1,88 + N$	
Centrifugal forward curved fan and centrifugal radial bladed fan	B, D	total	$0,125 \leq P \leq 10$	$\eta_{target} = 2,74 \cdot \ln(P) - 6,33 + N$	56
			$10 < P \leq 500$	$\eta_{target} = 0,78 \cdot \ln(P) - 1,88 + N$	
	A, C	static	$0,125 \leq P \leq 10$	$\eta_{target} = 2,74 \cdot \ln(P) - 6,33 + N$	37
			$10 < P \leq 500$	$\eta_{target} = 0,78 \cdot \ln(P) - 1,88 + N$	
Centrifugal backward curved fan without housing	B, D	total	$0,125 \leq P \leq 10$	$\eta_{target} = 2,74 \cdot \ln(P) - 6,33 + N$	42
			$10 < P \leq 500$	$\eta_{target} = 0,78 \cdot \ln(P) - 1,88 + N$	
	A, C	static	$0,125 \leq P \leq 10$	$\eta_{target} = 2,74 \cdot \ln(P) - 6,33 + N$	58
			$10 < P \leq 500$	$\eta_{target} = 0,78 \cdot \ln(P) - 1,88 + N$	
Centrifugal backward curved fan with housing	A, C	static	$0,125 \leq P \leq 10$	$\eta_{target} = 4,56 \cdot \ln(P) - 10,5 + N$	58
			$10 < P \leq 500$	$\eta_{target} = 1,1 \cdot \ln(P) - 2,6 + N$	
	B, D	total	$0,125 \leq P \leq 10$	$\eta_{target} = 4,56 \cdot \ln(P) - 10,5 + N$	61
			$10 < P \leq 500$	$\eta_{target} = 1,1 \cdot \ln(P) - 2,6 + N$	
Mixed flow fan	A, C	static	$0,125 \leq P \leq 10$	$\eta_{target} = 4,56 \cdot \ln(P) - 10,5 + N$	47
			$10 < P \leq 500$	$\eta_{target} = 1,1 \cdot \ln(P) - 2,6 + N$	
Cross flow fan	B, D	total	$0,125 \leq P \leq 10$	$\eta_{target} = 1,14 \cdot \ln(P) - 2,6 + N$	21
			$10 < P \leq 500$	$\eta_{target} = N$	

**Table 2. Second tier minimum energy efficiency requirements for fans from 1 January 2015**

Fan types	Measurement category (A-D)	Efficiency category (static or total)	Power range in kW	Target energy efficiency	Efficiency grade
Axial fan	A, C	static	$0,125 \leq P \leq 10$	$\eta_{target} = 2,74 \cdot \ln(P) - 6,33 + N$	40
			$10 < P \leq 500$	$\eta_{target} = 0,78 \cdot \ln(P) - 1,88 + N$	
Centrifugal forward curved fan and centrifugal radial bladed fan	B, D	total	$0,125 \leq P \leq 10$	$\eta_{target} = 2,74 \cdot \ln(P) - 6,33 + N$	60
			$10 < P \leq 500$	$\eta_{target} = 0,78 \cdot \ln(P) - 1,88 + N$	
	A, C	static	$0,125 \leq P \leq 10$	$\eta_{target} = 2,74 \cdot \ln(P) - 6,33 + N$	42
			$10 < P \leq 500$	$\eta_{target} = 0,78 \cdot \ln(P) - 1,88 + N$	
Centrifugal backward curved fan without housing	B, D	total	$0,125 \leq P \leq 10$	$\eta_{target} = 2,74 \cdot \ln(P) - 6,33 + N$	47
			$10 < P \leq 500$	$\eta_{target} = 0,78 \cdot \ln(P) - 1,88 + N$	
	A, C	static	$0,125 \leq P \leq 10$	$\eta_{target} = 4,56 \cdot \ln(P) - 10,5 + N$	62
			$10 < P \leq 500$	$\eta_{target} = 1,1 \cdot \ln(P) - 2,6 + N$	
Centrifugal backward curved fan with housing	A, C	static	$0,125 \leq P \leq 10$	$\eta_{target} = 4,56 \cdot \ln(P) - 10,5 + N$	61
			$10 < P \leq 500$	$\eta_{target} = 1,1 \cdot \ln(P) - 2,6 + N$	
	B, D	total	$0,125 \leq P \leq 10$	$\eta_{target} = 4,56 \cdot \ln(P) - 10,5 + N$	64
			$10 < P \leq 500$	$\eta_{target} = 1,1 \cdot \ln(P) - 2,6 + N$	
Mixed flow fan	A, C	static	$0,125 \leq P \leq 10$	$\eta_{target} = 4,56 \cdot \ln(P) - 10,5 + N$	50
			$10 < P \leq 500$	$\eta_{target} = 1,1 \cdot \ln(P) - 2,6 + N$	
Cross flow fan	B, D	total	$0,125 \leq P \leq 10$	$\eta_{target} = 1,14 \cdot \ln(P) - 2,6 + N$	21
			$10 < P \leq 500$	$\eta_{target} = N$	

### 6.3 ECONOMIC DATA

#### Fan cost [2]

Prices will depend on type, style and size of fan as well as its application. There may also be considerable differences between the European Member States concerning product price.

In the following table overall gross prices of different type of fan products are expressed as a linear function depending on fan power. The prices used to calculate the function parameter are taken from several manufacturers catalogues and include all necessary drive components and other accessories. However the price of the same product can lie typically comprise 50 and 150 % of the list price of a manufacturer [2].

Fan type		Cost [€]
Axial	<= 300 Pa (static pressure)	435.95 P + 560.11
	> 300 Pa (static pressure)	180.3 P + 993.27
Centrifugal	Forward curved blades (with casing)	119.73 P + 644.43
	Backward curved blades (no casing)	112.92 P + 759.51
	Backward curved blades (with scroll housing)	191.43 P + 1431
Other	Box fans	516.17 P + 726.3
	Roof fans	782.38 P + 695.17
P = Fan power expressed in kW		

Source : Lot 11: Fans for ventilation in non residential buildings Final Report [2]

Installation cost

The installation costs for the fan alone will typically make of **50 to 100 % of the purchase costs**, however the installation cost of the fan are typically small compared to the total cost of the ventilation system.

7 ADDITIONAL SUPPORT

if you don't know the actual motor efficiency use the equations in following table to estimate it.

Default Static efficiency of fans

Fan type		Average efficiency
Axial	<= 300 Pa (static pressure)	If P > 40 0.0239ln(P)+0.3037
	> 300 Pa (static pressure)	If P ≤ 40 0.0522 ln(P) + 0.3203
Centrifugal	Forward curved blades (with casing)	-0.0086 ln(P) + 0.3731
	Backward curved blades (no casing)	0.0348 ln(P) + 0.3493
	Backward curved blades (with scroll housing)	0.0412 ln(P) + 0.5093
Other	Box fans	0.0453 ln(P) + 0.4764
	Roof fans	0.0702 ln(P) + 0.3012
P = Fan power expressed in kW		0.0326 ln(P) + 0.4297

References

- [1]Implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and the council with regard to ecodesign requirements for fans driven by motors with an electric input power between 125W and 500kW .
- [2] EuP Lot 11: Fans for ventilation in non residential buildings Final Report

## P4.1 USE THE BEST CLASS OF PUMPS

Interaction :

- You could also generate the possibility to adopt variable speed control strategy (ECO P1.5) according chillers control.
- You could verify that pumps deliver

### 1 EXISTING SUBSYSTEMS ON WHICH THE ECO MAY APPLY

- End suction pumps having their own bearing
- End suction close coupled pumps, with the impeller on the motor shaft
- Double entry pumps having an axially split casing

### 2 CONSIDERED ACTIONS

You could replace pump with high efficiency class/pump type.

### 3 TECHNICAL DATA TO REQUEST TO OWNER/MANAGER OR TO FIND DIRECTLY (MANUFACTURER DATA)

- Pump efficiency
- Speed(rpm)
- Pump flow
- Head (m) if unknown evaluate it using head pressure losses and height of circuit

### 4 TECHNICAL OBSERVATIONS TO BE MADE ON SITE

Monitoring of existing situations

Pump flow

### 5 CRITERION FOR ECO APPLICABILITY

The following criterion must be verify successively. If one of them isn't been verify , the replacement of pump can be considered.

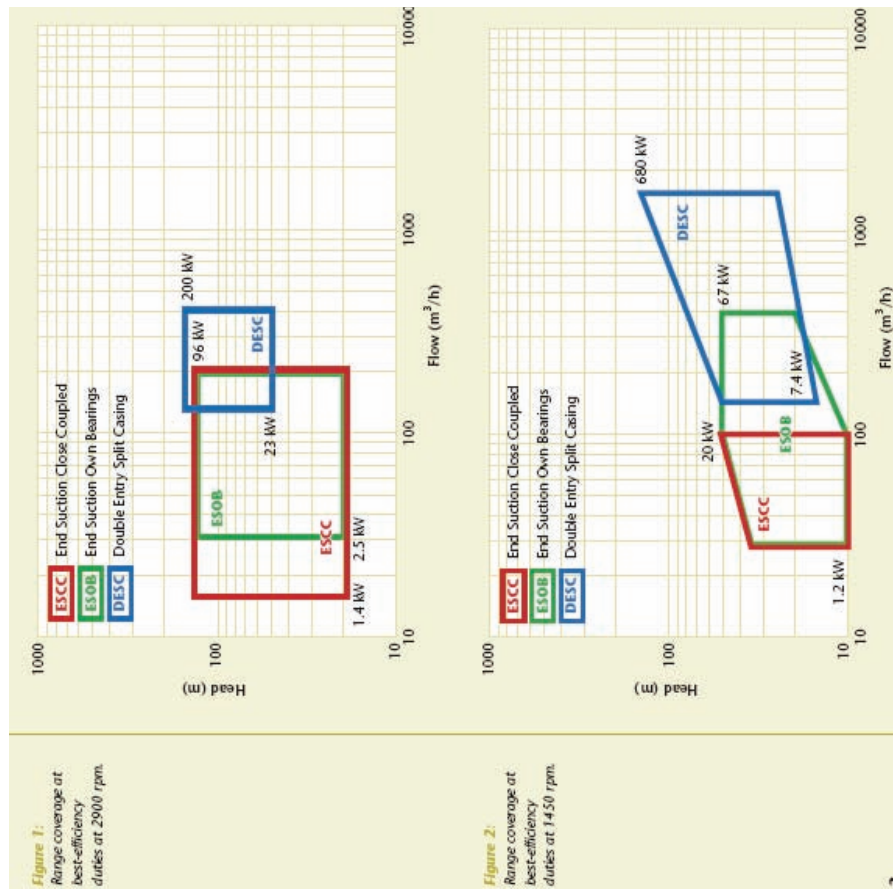
- You can examine figure 1 and 2 to check if the existing pump is in the range of best efficient types
- You must correct rated efficiency using correction factor on the right-hand axis

You have to use corrected efficiency (=rated efficiency+correction factor) to do a comparison between existing pumps and reference pump efficiency curves.

Then you can estimate savings using the same methodology for a new selected pump.

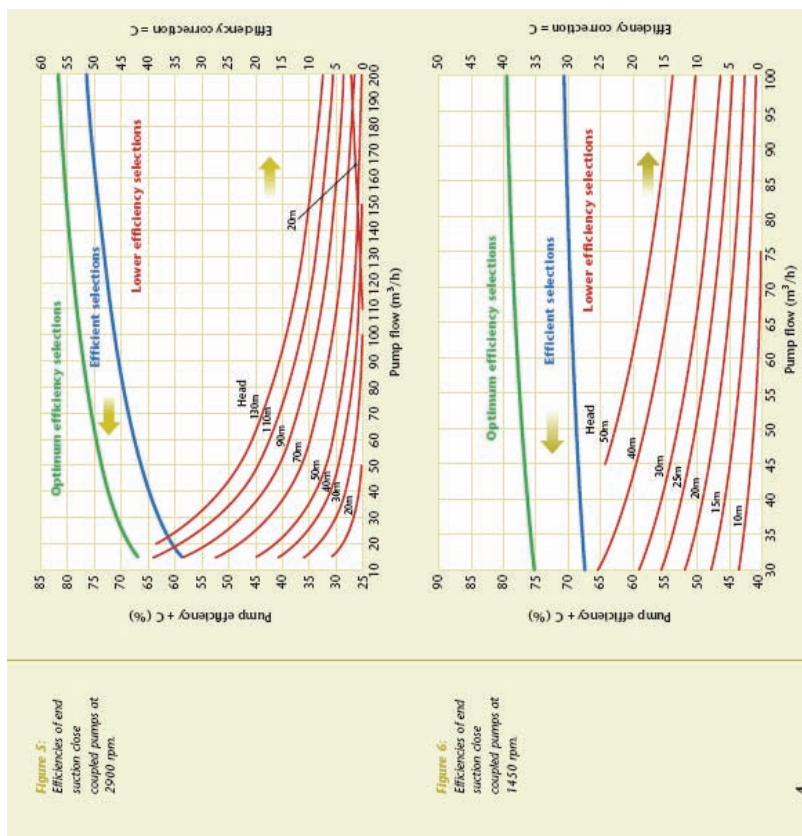
### 6 RECOMMENDATION FOR REALISATION OF ECO

A Reference tool is given in 1 to determine performance references:

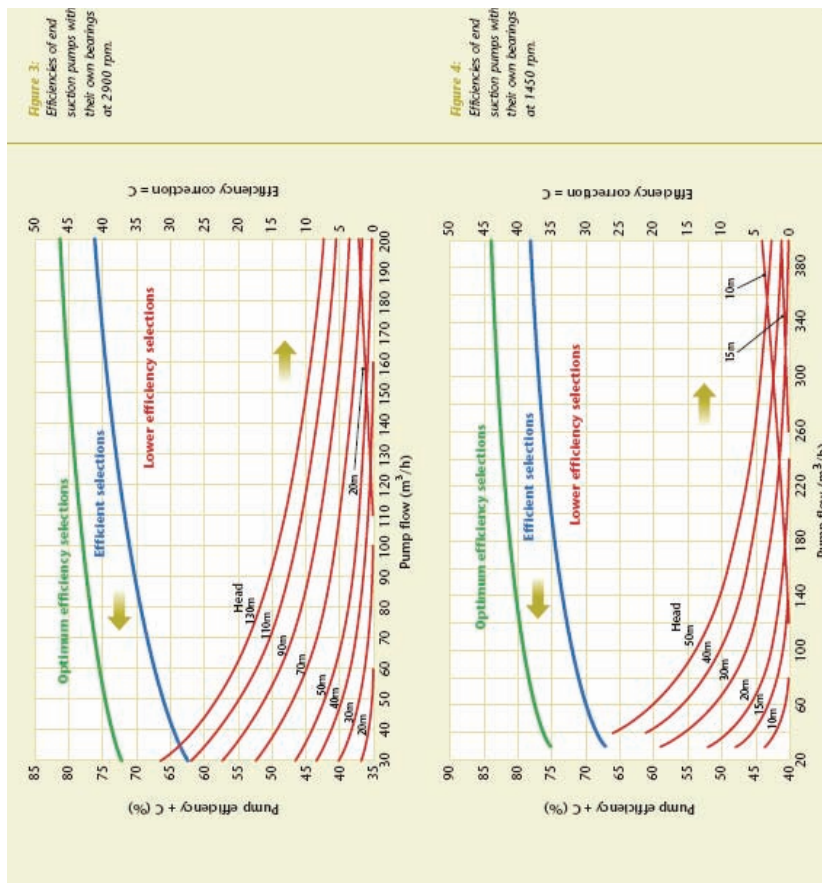


Extracted from [1]



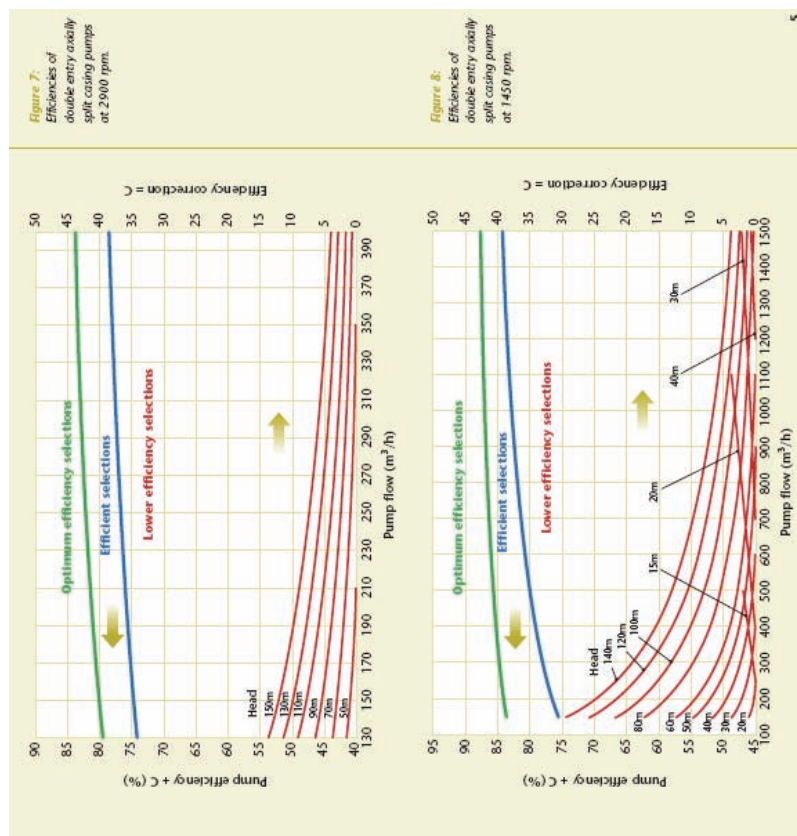


Extracted from [1]



Extracted from [1]





Extracted from [1]

## 7 REFERENCES

[1] European guide to pump efficiency for single stage centrifugal pumps (2003)

You can search for motor's efficiency as a point (and precise load ratio at this point) or as a load/efficiency curve.

4 TECHNICAL OBSERVATIONS TO BE MADE ON SITE

You can search for on nameplate rated power, rated current, rated voltage, rated frequency and speed. Common monitoring of existing situations

- Initial flow rate
- Motor monitoring: RMS current mean of 3 phases, Root Mean Square(RMS) voltage mean line to line of 3 phases and power factor.
- Occupancy schedule per zone.
- Motor's size must be examined to verify required power supply at maximum flow rate condition.(see P4.1)

5 SPECIFIC MONITORING OF EXISTING SITUATIONS

5.1 {SUBSYSTEM 1} MONITORING

No specific monitoring suggested

5.2 {SUBSYSTEM 2} MONITORING

Output/input frequency of power supply converter

5.3 {SUBSYSTEM 3} MONITORING

Output/input voltage of power supply converter

6 CRITERION FOR ECO APPLICABILITY

Depending on subsystem type you can examine the following actions:

	Subsystem 1 Staged chiller	Subsystem 2 Parallel chiller
action 1	ok	
action 2	ok	
action 3		ok
action 4		ok

6.1 CRITERION FOR {SUBSYSTEM 1}



P4.# Water handling / Water distribution

P4.5 INSTALL VARIABLE FLOW RATE PUMPING

1 EXISTING SUBSYSTEMS ON WHICH THE ECO MAY APPLY

- Subsystem 1: Pumps which distribute cold water of staged chillers for variable cooling production and which don't operate at variable water flow rate (possible?)
- Subsystem 2: Pumps which distribute cold water of multiple chillers for variable cooling production.

2 CONSIDERED ACTIONS

2.1 CONSIDERED ACTION 1

To control the pump motor with a variable speed drive (VSD) strategy=>1

2.2 CONSIDERED ACTION 2

To replace existing pump(s) with a variable volume pumping at same design conditions

2.3 CONSIDERED ACTION 3

To replace existing pump(s) with a bigger variable volume pumping at same design condition

2.4 CONSIDERED ACTION 4

To replace existing pumps with a bigger pump controlled by VSD

3 TECHNICAL DATA TO REQUEST TO OWNER/MANAGER OR TO FIND DIRECTLY (MANUFACTURER DATA)



The criterion of an oversized motor is based on load ratio, which is the ratio between the measured input power and the power required when the motor operates at rated power. Indeed, most electric motors are designed to run between 50% and 100% of rated load. A motor efficiency decreases dramatically below 50% load.

The criterion is when load measure ratio is under 70% then action 1(a replacement of the motor) must be done.

If load measure ratio is between 70% and 95% action 2 must be done.

## 6.2 CRITERION FOR {SUBSYSTEM 2}

The criterion is when load measure ratio is under 30% then action 1(a replacement of the motor) must be done.

## 6.3 CRITERION FOR {SUBSYSTEM 3}

The criterion is when load measure ratio is under 40% then action 1(a replacement of the motor) must be done.

## 7 RECOMMENDATION FOR REALISATION OF ECO

You could control volume pumping in order to match cooling needs (by a control of input/output temperature of cooled water.(see ECO 04.22)

## 8 ADDITIONAL SUPPORT

### 8.1 EQUATIONS

- **Eq1**  $load = (\Omega_S - \Omega) / (\Omega_S - \Omega_N)$

where  $\Omega_N = 60 * f / p$

$load = P_m / P_N$

$p$  number of pole couple

$f$  frequency of motor supply power

$\Omega_S$  synchronous speed in rpm

$\Omega_N$  nameplate speed

$P_m$  measured input three phase power

$P_N$  nameplate power.



- **Eq2**  $load = \frac{(\Omega_{SC} - \Omega_C)}{\Omega_{SC}} \frac{\Omega_N}{(\Omega_{SO} - \Omega_C)}$

Where  $\Omega_{SC}$  current synchronous speed in rpm (calculate with output frequency of converter)

$\Omega_N$  nameplate speed in rpm

$\Omega_{SO}$  original synchronous speed in rpm

## 8.2 REFERENCES

[1] *Determining motor efficiency and load, Motor challenge program US departement of energy.*

[2] *Fascicule technique, L'adaptation des pompes et des ventilateurs aux besoins, variation de vitesse.*

[3] *Ventilateurs et pompes, série de la gestion de l'énergie volume 13, Energie mines et ressources Canada*

## 9 REMARKS



P5.# Terminal unit

P5.3 INCREASE HEAT EXCHANGER SURFACE AREA
1 EXISTING SUBSYSTEMS ON WHICH THE ECO MAY APPLY
<ul style="list-style-type: none"><li>Fan coil units</li><li>Air handling units</li></ul>
2 CONSIDERED ACTIONS
To increase heat exchanger surface area of terminal units/AHU and to modify set points of chillers accordingly.
3 TECHNICAL DATA TO REQUEST TO OWNER/MANAGER OR TO FIND DIRECTLY (MANUFACTURER DATA)
<ul style="list-style-type: none"><li>Temperature regime</li><li>Heat exchange coefficient</li></ul>
4 TECHNICAL OBSERVATIONS TO BE MADE ON SITE
<ul style="list-style-type: none"><li>To check temperatures looking for all valves</li><li>Hydraulic balancing</li><li>Nominal capacity of TU</li></ul>
5 MONITORING OF EXISTING SITUATIONS
Temperature inside zone
6 CRITERION FOR ECO APPLICABILITY
You could compare installed nominal power of TU with required load.
Oversized classic FCU will allow higher operating temperatures at chiller's level hence an improved EER. For instance moving from the classic 7/12 °C regime to 8/13 °C will increase average from 9.5 °C to 10.5 °C. It will at the same time reduce temperature difference between room and FCU from 12.5 K to 11.5K (with 22 °C inside) and increase requested area. This process can be extrapolated by a few more degrees but two phenomena appear : the exponential nature of heat exchange and an additional demand for blowing power inside the FCU.
As a counterpart, more fan power of terminal unit is required ; it will increase fan consumption (and heat released in the room).
First, it is necessary to evaluate the energetic benefit of the action.

Second, in case it is beneficial, costs of oversizing the heat exchange areas should be balanced with energy gains in a cost benefit analysis.

7 RECOMMENDATION FOR REALISATION OF ECO
To check hydraulic balance
8 ADDITIONAL SUPPORT
References
Final report EECCAC 2003
9 REMARKS

O2.# General HVAC system

O2.3 SHUT OFF AUXILIARIES WHEN NOT REQUIRED	
1 EXISTING SUBSYSTEMS ON WHICH THE ECO MAY APPLY	<ul style="list-style-type: none"><li>AHU fans</li><li>FCU fans</li><li>pumps</li></ul>
2 CONSIDERED ACTIONS	<p>To shut off auxiliaries during unoccupied period.</p> <p>To make use every day of controllers in place.</p>
3 TECHNICAL DATA TO REQUEST TO OWNER/MANAGER OR TO FIND DIRECTLY (MANUFACTURER DATA)	<ul style="list-style-type: none"><li>Nominal power of auxiliaries.</li><li>Unoccupied period.</li></ul>
4 TECHNICAL OBSERVATIONS TO BE MADE ON SITE	<ul style="list-style-type: none"><li>Nameplate data of auxiliaries.</li></ul>
5 MONITORING OF EXISTING SITUATIONS	<p>You have to monitor electrical power of auxiliaries to enhance estimation of savings.</p>
6 CRITERION FOR ECO APPLICABILITY	<p>The time of unoccupied period could be directly used to estimate the savings. This period is directly multiplied by the power of auxiliaries.</p> <p>A reduce of unoccupied period should be used to ensure thermal comfort in order to integrate a preoccupancy cycle especially for winter mode.</p>
7 RECOMMENDATION FOR REALISATION OF ECO	<p>You should estimate winter/summer mode using the method which is proposed in ECO O2.7.</p> <p>You have to consider a preoccupancy cycle to obtain a conservative estimation of energy savings.</p>



8 ADDITIONAL SUPPORT

9 REMARKS



O2.# General HVAC system

## O2.7 SEQUENCE HEATING AND COOLING

Interaction :

- O2.2 Shut-off A/C equipments when not needed.
- O2.3 Shut-off auxiliary when not required.
- P1.3 Modify controls in order to sequence heating and cooling.

### 1 EXISTING SUBSYSTEMS ON WHICH THE ECO MAY APPLY

Air and water based distribution system (Air Handling Unit), water-based distribution system (FCU), and other central systems (rooftop, Variable Refrigerant Flow)

#### 1.1 SUBSYSTEM 1: CENTRAL CONTROL

**Central control** of heating and cooling generators and associated water circuit (winter summer mode).

#### 1.2 SUBSYSTEM 2: LOCAL CONTROL

**Local control** of heating and cooling distribution (zone temperature control).

### 2 CONSIDERED ACTIONS

#### 2.1 ACTION 1 TO BE APPLIED TO SUBSYSTEM 1 CENTRAL CONTROL

- To check HVAC system central control.
- To define better cooling season and heating season.
- To stop heating and cooling generators and associated auxiliary (e.g. pumps) equipment according to previously defined seasons.

#### 2.2 ACTION 2 TO BE APPLIED TO SUBSYSTEM 2 LOCAL CONTROL

### 3 TECHNICAL DATA TO REQUEST TO OWNER/MANAGER OR TO FIND DIRECTLY (MANUFACTURER DATA)

- To determine system type of FCU: 2 pipes or 4 pipes.
- To establish a list of controls.



### 3.1 SPECIFIC DATA FOR SUBSYSTEM 1 CENTRAL CONTROL

- To determine the type of control for heating/cooling, i.e. Winter/Summer mode is manual or auto. When manual, how are determined the seasons?
- Number of times operation comes to change mode.

### 3.2 SPECIFIC DATA FOR SUBSYSTEM 2 LOCAL CONTROL

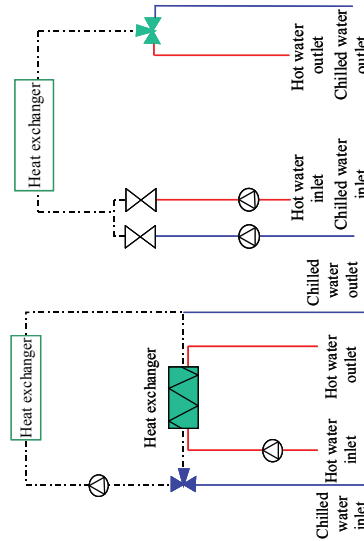
- To determine how are controlled terminal units and coils.

### 4 TECHNICAL OBSERVATIONS TO BE MADE ON SITE

- All inputs of SimAudit are required to simulate audited building and to evaluate energy savings or to operate HVAC system.

You can identify 2 pipes system by recognition of the following architecture type (see figure 1).

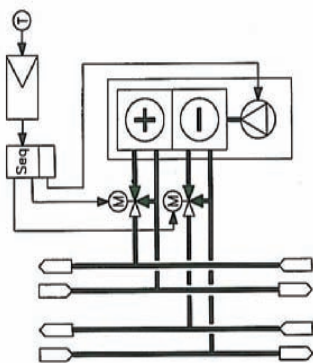
Figure 1 Change-over 2 pipes system without/with mixing



There are 2 distinct coils for heating and cooling for 4 pipes system (see figure 2)



Figure 2 4 pipes system



## 5 MONITORING OF EXISTING SITUATIONS

### 5.1 SPECIFIC MONITORING FOR SUBSYSTEM 1 CENTRAL CONTROL

Inputs related to SimAudit calibration have to be monitored.

### 5.2 SPECIFIC MONITORING FOR SUBSYSTEM 2 LOCAL CONTROL

You could test sequence by forcing controls through controller interface and check position/operation of control valve, damper....

## 6 CRITERION FOR ECO APPLICABILITY

### 6.1 CRITERION FOR SUBSYSTEM 1 CENTRAL CONTROL

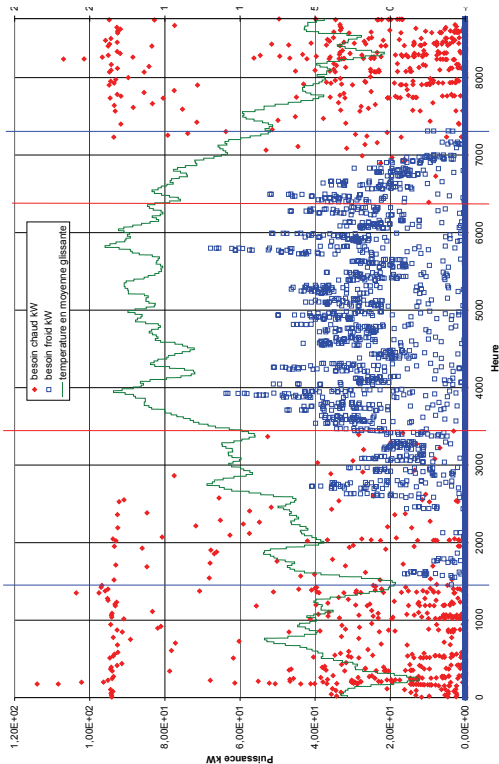
#### 4 PIPES

You can simulate your building with SimAudit to examine cooling demand and heating demand to define cooling mode and heating mode.

Indeed, you can plot cooling demand and heating demand as a function of time (see figure 3). Heating generator can be stopped when there isn't heating demand and on the contrary can be switched when necessary. Similarly, cooling season can be determined.

If pumps of water circuit are switched on all the year round, it is possible to switch off auxiliary when they are not required. **Electrical consumption of pumps is reduced by 33%** i.e. a **reduction of 0.9kWh/m<sup>2</sup>** for a typical office building (total consumption of 120kWh/m<sup>2</sup>) in Belgium with 2 separated pumps.

Figure 3 Results of cooling demand and heating demand for a simulated building



Red plots correspond to heating demand and blue plots to cooling demand.

Red lines limits heating season and blue lines limits cooling season.

#### 2 PIPES

For a 2 pipes system, a definition of cooling and heating season is needed to system operation. Changeover valve must be activated according to these seasons.

A simulation could be made to evaluate energy and thermal comfort impact of a fixed date. Auxiliary equipment could also be switched off when not required. Thermal comfort impact can be examined according to [1].

### 6.2 CRITERION FOR SUBSYSTEM 2 LOCAL CONTROL

#### 4 PIPES SYSTEM

On figure 4, the temperature set points (T1 and T2) can be modified to sequence heating (1) and cooling (2).

The dead-band (see 1 on figure 4) could have disappeared if temperature measurement is not calibrated or not accurate. Figure 5 shows a problem of cool and heat supply timing.

You should estimate occurrences of simultaneous heating and cooling demand. You could consider temperature set points (and possible problems of measurement) and hourly outside temperature to identify interactions of cooling/heating.

Figure 4 Correct dead-band

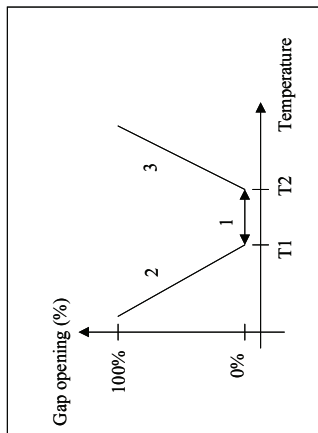
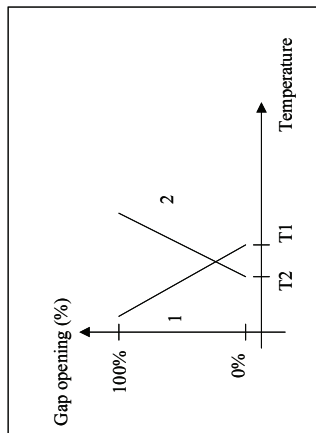


Figure 5 Problem of dead-band

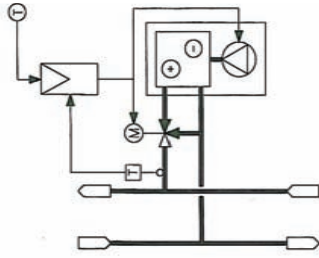


## 2 PIPES SYSTEM

The same methodology must be applied.

Local controller splits the control law for cooling and heating, and there are two set points like for a 4 pipes system. The controller is often manual (centralized by zone) and perhaps automatically switched by a temperature sensor located at water terminal unit inlet, this sensor has to be calibrated (see figure 6).

Figure 6 Automatic selection of control law by water temperature inlet



## 7 RECOMMENDATION FOR REALISATION OF ECO

### 7.1 RECOMMENDATION FOR SUBSYSTEM 1 CENTRAL CONTROL

- For 4 pipes systems, you could meet operator one week before the date estimated by simulation tool.
- For 2 pipes system an automatic changeover control is proposed in ECO form P1.3 (Modify controls in order to sequence heating and cooling). Consumption of cooling demand (thermal) is reduced by 6.2%, it corresponds to a reduction of 0.15 kWh/m<sup>2</sup>(thermal) (total cooling demand 32.2kWh/m<sup>2</sup> (thermal)). A BEMs is required (if not a big number of operations is required to switch-over the control mode in the building to achieve thermal comfort of occupant)

### 7.2 RECOMMENDATION FOR SUBSYSTEM 2 LOCAL CONTROL

You can maintain proper temperature set point ECO O2.4

## 8 ADDITIONAL SUPPORT

[1] European comfort norm EN 15251 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics.

## 9 REMARKS

If a country already established a definition of operation timing for heating and cooling, local law for heating and cooling seasons has to be applied.



O3.# Cooling equipment

### O3.5 MAINTAIN PROPER STARTING FREQUENCY AND RUNNING TIME OF CHILLERS

*Before, you have to check correct size of equipment/cooling load*

*Interaction: ECO 03.6 Improve part load operation control, ECO 03.8, ECO 02.2*

#### 1 EXISTING SUBSYSTEMS ON WHICH THE ECO MAY APPLY

Chiller, single stage

#### 2 CONSIDERED ACTIONS

- Action 1: To maintain evaporating pressure controller
- Action 2: To maintain security evaporating pressure controller
- Action 3: To maintain security condensation pressure controller
- Action 4: To adjust thermostat set point
- Action 5: To maintain electrical supply (maintain sufficient voltage, balance the 3 phases)
- Action 6: To maintain cycle controller (if there is a cold water tank which isn't used for storage)

#### 3 TECHNICAL DATA TO REQUEST TO OWNER/MANAGER OR TO FIND DIRECTLY (MANUFACTURER DATA)

Chiller number of capacity stages (1)

Recommended value from manufacturer of maximum starting frequency and minimum running time

#### 4 TECHNICAL OBSERVATIONS TO BE MADE ON SITE

#### 5 MONITORING OF EXISTING SITUATIONS

You can use a running time meter to monitor chiller operations:

- Running time (hours)
- Number of start/cycle per hour

HARMONAC

#### 6 CRITERION FOR ECO APPLICABILITY

In case of high cooling load, the operating period is close to 1 and this decreases with load. The number of cycles per hour depends on the thermostat and on the inertia of water loop. The on-time over a cycle depends on load. In case, there is a lack in cooling capacity, the total on time fraction will be changed as well as the cycle (on time + off time) frequency.

- If running times are too long, it may be because of a capacity loss of the chiller, you have to check and maintain proper evaporating and condensation temperatures see ECO 03.7.
- If the number of cycles per hour is too high, you have to check the different actions in section 2.

#### 7 RECOMMENDATION FOR REALISATION OF ECO

#### 8 ADDITIONAL SUPPORT

#### 9 REMARKS

HARMONAC

- Check if there are pumps and/or fans offline



O3.# Cooling equipment

### O3.7 MAINTAIN PROPER EVAPORATING AND CONDENSING TEMPERATURES

Before this ECO, you have to check sizing of equipment. Indeed oversizing or undersizing could be the cause of improper evaporating/condensing temperatures.

#### 1 EXISTING SUBSYSTEMS ON WHICH THE ECO MAY APPLY

- Chiller and plate/tube coil condenser
- Direct expansion system plate/tube coil condenser
- Split/multisplit system

#### 2 CONSIDERED ACTIONS

In order to maintain proper temperature regime you have to adjust temperature of condensation and evaporation by:

- Checking and maintaining refrigerant fluid load see ECO O3.15
- Checking and maintaining refrigerant/heat carrier/cooling fluid flow rate ECO O3.12
- Checking and maintaining functioning of chiller expansion valve ECO O3.13
- Checking and maintaining set points/controllers/sensors

#### 3 TECHNICAL DATA TO REQUEST TO OWNER/MANAGER OR TO FIND DIRECTLY (MANUFACTURER DATA)

- Nominal evaporation/condensation temperature
- Regular refill of refrigerant

#### 4 TECHNICAL OBSERVATIONS TO BE MADE ON SITE

Possible observations to detect the problem are:

- Leaks of refrigerant on evaporator/condenser/carter (small pieces, junctions, temperature sensor, flow meter)
- Local freezing on expansion valve
- Gas bubble at glass screen



5 MONITORING OF EXISTING SITUATIONS

The following values have to be measured if technically feasible:

Symbol	Description
pcond	Condensate pressure of refrigerant fluid (bar)
Pevap	Evaporation pressure of refrigerant fluid (bar)
Paspi	Inlet pressure of compressor (bar)
pfoutl	Outlet pressure of compressor (bar)
Tcond	Condensate temperature of refrigerant fluid (°C)
Tevap	Evaporation temperature of refrigerant fluid (°C)
Tfisc	Temperature of refrigerant fluid at the outlet of evaporator (°C)
Tfisc	Temperature of refrigerant fluid at the outlet of condenser (°C)
Tfrec	Temperature of cooling fluid at the inlet of condenser (°C)
Tfisc	Temperature of cooling fluid at the outlet of condenser (°C)
Tfrec	Temperature heat carrier fluid at the inlet of evaporator (°C)
Tfisc	Temperature heat carrier fluid at the outlet of evaporator (°C)
t	Effective operating time per hour (min/h)
n	Number of start per hour (h-1)
Pfrigo	Cooling production power (W)
Ppomp	Electrical pump power (W)
Pvent	Electrical absorbed power by each fan (W)

6 CRITERION FOR ECO APPLICABILITY

According to feasible measurements, you have to calculate some of the following values:

Symbol	Equation	Description
T1	$T_{fisc} - T_{cond}$	Subcooling of refrigerant fluid on condenser
T2	$T_{fisc} - T_{frec}$	Temperature difference of cooling fluid on condenser
T3a	$T_{cond} - T_{frec}$	Temperature difference of condensate and cooling fluid at the inlet of condenser
T3b	$T_{cond} - T_{fisc}$	Temperature difference of condensate and cooling fluid at the outlet of condenser
T6	$T_{fisc} - T_{evap}$	Overheating of refrigerant fluid at evaporator
T7	$T_{fisc} - T_{frec}$	Temperature difference of heat carrier fluid on evaporator
T8a	$T_{frec} - T_{evap}$	Temperature difference of heat carrier fluid at the inlet of evaporator and evaporation
T8b	$T_{frec} - T_{evap}$	Temperature difference of heat carrier fluid at the outlet of evaporator and evaporation



You have to compare the values with the following reference values

- Depending on the type of condenser (plate/tube), the reference values for a chiller system are the following :

	Air	Water					
		Plate	Lost water	Recycle			Evaporative
				Opened tower	Closed tower	Hybrid	
ΔT1	3-5 / 3-5	- / 1-5	3-7 / 3-7	3-7 / 3-7	3-7 / 3-7	3-7 / 3-7	3-7 / 3-7
ΔT2	3-8 / 3-8	-	10-15 / 10-15	5 / 5	5 / 5	5 / 5	-
ΔT3a	12-15 / 12-15	-	-	-	-	-	-
ΔT3b	-	- / 3-5	5 / 5	5 / 5	5 / 5	5 / 5	-
ΔT6	4-6 / 4-7	- / 4-7	4-6 / 4-7	4-6 / 4-7	4-6 / 4-7	4-7 / 4-7	4-6 / 4-7
ΔT7	5 / 4-5	-	5 / 4-5	5 / 4-5	5 / 4-5	5 / 4-5	5 / 4-5
ΔT8a	-	-	-	-	-	-	-
ΔT8b	4-6 / 2-5	- / 2-5	4-6 / 2-5	4-6 / 2-5	4-6 / 2-5	4-6 / 2-5	4-6 / 2-5

Extracted from [1]

- Depending on the type of condenser (plate/tube), the reference values for a direct expansion system or multisplit system are the following :

	Air	Water					Evaporative
		Lost water	Recycle	Recycle	Recycle	Hybrid	
			Opened tower	Closed tower			
ΔT1	3-5 / 3-5	3-7 / 1-5	3-7 / 1-5	3-7 / 1-5	3-7	3-7	
ΔT2	3-8 / 3-8	10-15 / 10-15	5 / 5	5 / 5	5 / 5	-	
ΔT3a	12-15 / 12-15	-	-	-	-	-	
ΔT3b	-	5 / 2-5	5 / 2-5	5 / 2-5	5 / 2-5	-	
ΔT6	4-7 / 4-7	4-7 / 4-7	4-7 / 4-7	4-7 / 4-7	4-7 / 4-7	4-7 / 4-7	
ΔT7	2-5 / 2-5	2-5 / 2-5	2-5 / 2-5	2-5 / 2-5	2-5 / 2-5	2-5 / 2-5	
ΔT8a	6-10 / 6-10	6-10 / 6-10	6-10 / 6-10	6-10 / 6-10	6-10 / 6-10	6-10 / 6-10	
ΔT8b	-	-	-	-	-	-	

Extracted from [1]

So for each of the value you determine if the actual temperature difference is lower or higher than references.



- If refrigerant fluid **evaporating/condensation temperature and pressure are lower than references value**, you have to check the table below to determine the problem to be corrected, i.e.  $\Delta T_6$  and  $\Delta T_8$  for evaporation temperatures /  $\Delta T_3$  and  $\Delta T_1$  for condensation temperatures are different than reference values, you have to examine the following possibilities:

	ECO 03.15 Low charge of refrigerant	ECO 03.13 Expansion device	ECO 03.12 Flow rate of refrigerant fluid too low	ECO 03.12 Flow rate of heat carrier fluid too low	ECO 03.12 Flow rate of cooling fluid too high	Check problem of control/temperature sensor
V/ual leaks	Y					
Gas bubble	Y					
Regular refilled	Y					
Freeze on part of equipment (expansion/detachment valve etc)		Y	Y			
Pumps / motors offline				Y		
Tfcee						-
Tfcese						-
T1	-	-	-			
T2					-	
T6	+	+	+			
T7						
T8a	?	+				
T8b	?	+				

"+" indicates that measurements are higher than reference values

"-" indicates that measurements are lower than reference values

"?" indicates a possible visual detection

- If refrigerant fluid **evaporating/condensation temperature and pressure are higher than nominal value**, you have to check the table below to determine the problem to be corrected, i.e.  $\Delta T_6$  and  $\Delta T_8$  for evaporation temperatures /  $\Delta T_3$  and  $\Delta T_1$  for condensation temperatures are different than reference values, you have to examine the following possibilities:

	ECO 03.15 High charge of refrigerant / Parasitic fluid	ECO 03.12 Flow rate of refrigerant fluid too high	ECO 03.12 Flow rate of cooling fluid too low	Check problem of control/temperature sensor
Incorrect Set point				+
Pumps / motors offline			Y	
Tfcee				+
Tfcese				+
T1	?	-		
T2			+	+
T3a	-			
T3b	-			
T6		-		OK
T7				OK
Paspi				low and different of Pevap
Ppomp			to be examined	
Pvent			to be examined	
ppomp			+	
pcond			+	
Relationship Pcond/Tcond	not accurate			

"+" indicates that measurements are higher than reference values

"-" indicates that measurements are lower than reference values

"?" indicates a possible visual detection

**yellow marks** indicates criteria to understand why is evaporation state is improper

**green marks** indicates criteria to understand why is condensation state is improper

no mark it could be evaporation/condensation temperature/pressure problem.

## 7 RECOMMENDATION FOR REALISATION OF ECO



O3.# Cooling equipment

O3.13 MAINTAIN FUNCTIONING OF (REVERSIBLE) CHILLER EXPANSION DEVICE

Before examine this task, you have to check if solenoid valve is correctly closed (freeze on this valve). It could be likewise another component which decreases the flow rate of refrigerant fluid (filter,...). Indeed, the considered actions will increase the flow rate of refrigerant fluid (see ECO O3.12).

1 EXISTING SUBSYSTEMS ON WHICH THE ECO MAY APPLY

Refrigerant fluid loop.

2 CONSIDERED ACTIONS

- To adjust set point of expansion device.
- To replace expansion device.

3 TECHNICAL DATA TO REQUEST TO OWNER/MANAGER OR TO FIND DIRECTLY (MANUFACTURER DATA)

4 TECHNICAL OBSERVATIONS TO BE MADE ON SITE

Freeze localised on expansion device.

5 MONITORING OF EXISTING SITUATIONS

According to feasible measurements, you should measure and calculate the following values:

Symbol	Equation	Description
T1	$T_{fisc} - T_{oond}$	Subcooling of refrigerant fluid on condenser
T6	$T_{fise} - T_{evap}$	Overheating of refrigerant fluid at evaporator



8 ADDITIONAL SUPPORT

References:

[1] La pratique du froid, Jacquard P. S. Sandre, 2<sup>e</sup> Edition, 2004, PYC Edition Dunod.

9 REMARKS

Manufacturer data can be used instead of reference values provided in additional support.



O3.# Cooling equipment

O3.15 MAINTAIN FULL CHARGE OF REFRIGERANT

The expansion valve could modify proper flow rate of refrigerant fluid, it is exposed in ECO P3.13. It is assumed here that expansion device is operating correctly.

The flow rate of fluid is assumed to be at a correct set point (ECO O3.12).

1 EXISTING SUBSYSTEMS ON WHICH THE ECO MAY APPLY

Refrigerant circuit.

2 CONSIDERED ACTIONS

- Action 1: Refill the full charge of refrigerant.
- Action 2: To maintain refrigerant loop.
- Action 3: To drain out refrigerant loop.

3 TECHNICAL DATA TO REQUEST TO OWNER/MANAGER OR TO FIND DIRECTLY (MANUFACTURER DATA)

4 TECHNICAL OBSERVATIONS TO BE MADE ON SITE

- Nominal charge of refrigerant.
- Regular refill (compulsory documentation due to F-Gas directive).

5 MONITORING OF EXISTING SITUATIONS

According to feasible measurements, you have to monitor and calculate some of the following values:

Symbol	Equation	Description
T1	Tfisc – Tcond	Subcooling of refrigerant fluid on condenser
T3a	Tcond – Tfrec	Temperature difference of condensation and cooling fluid at the inlet of condenser
T3b	Tcond – Tfisc	Temperature difference of condensation and cooling fluid at the outlet of condenser
T6	Tfise – Tevap	Overheating of refrigerant fluid at evaporator
T8a	Tfoee – Tevap	Temperature difference of heat carrier fluid at the inlet of evaporator and evaporation



6 CRITERION FOR ECO APPLICABILITY

You should compare the values with the following reference values

- Depending on the type of condenser (plate/tube), the reference values for a chiller system are the following :

	Air	Water				Evaporative
		Plate	Lost water	Recycle	Recycle	
			Opened tower	Closed tower	Hybrid	
ΔT1	3-5 / 3-5	-1/-5	3-7 / 3-7	3-7 / 3-7	3-7 / 3-7	3-7 / 3-7
ΔT6	4-6 / 4-7	-1/-7	4-6 / 4-7	4-6 / 4-7	4-7 / 4-7	4-6 / 4-7

Extracted from [1]

- Depending on the type of condenser (plate/tube), the reference values for a direct expansion system or multisplit system are the following :

	Air	Water				Evaporative
		Lost water	Recycle	Recycle	Recycle	
			Opened tower	Closed tower	Hybrid	
ΔT1	3-5 / 3-5	3-7 / 1-5	3-7 / 1-5	3-7 / 1-5	3-7	3-7
ΔT6	4-7 / 4-7	4-7 / 4-7	4-7 / 4-7	4-7 / 4-7	4-7 / 4-7	4-7 / 4-7

Extracted from [1]

If ΔT6 is higher than reference value and ΔT1 is lower than reference value then there is a problem. First you have to adjust set point and if expansion valve is faulty, you have to replace it.

7 RECOMMENDATION FOR REALISATION OF ECO

8 ADDITIONAL SUPPORT

References:

[1] La pratique du froid, Jacquard P. S. Sandre, 2<sup>e</sup> Edition, 2004, PVC Edition Dunod.

9 REMARKS



T8b	Tfse – Tevap	Temperature difference of heat carrier fluid at the outlet of evaporator and evaporation
-----	--------------	--

Extracted from [1]

6 CRITERION FOR ECO APPLICABILITY

You have to compare the values with the following reference values

- Depending on the type of condenser (plate/tube), the reference values for a chiller system are the following :

	Air	Water					
		Plate	Lost water		Recycle		Evaporative
			Opened tower	Closed tower	Recycle Hybrid	Hybrid	
ΔT1	3-5 / 3-5	- / 1-5	3-7 / 3-7	3-7 / 3-7	3-7 / 3-7	3-7 / 3-7	3-7 / 3-7
ΔT3a	12-15 / 12-15	-	-	-	-	-	-
ΔT3b	-	- / 3-5	5 / 5	5 / 5	5 / 5	5 / 5	-
ΔT6	4-6 / 4-7	- / 4-7	4-6 / 4-7	4-6 / 4-7	4-7 / 4-7	4-7 / 4-7	4-6 / 4-7
ΔT8a	-	-	-	-	-	-	-
ΔT8b	4-6 / 2-5	- / 2-5	4-6 / 2-5	4-6 / 2-5	4-6 / 2-5	4-6 / 2-5	4-6 / 2-5

Extracted from [1]

- Depending on the type of condenser (plate/tube), the reference values for a direct expansion system or multisplit system are the following :

	Air	Water					
		Lost water	Recycle		Recycle Hybrid		Evaporative
			Opened tower	Closed tower	3-7	3-7	
ΔT1	3-5 / 3-5	3-7 / 1-5	3-7 / 1-5	3-7 / 1-5	3-7	3-7	3-7
ΔT3a	12-15 / 12-15	-	-	-	-	-	-
ΔT3b	-	5 / 2-5	5 / 2-5	5 / 2-5	5 / 2-5	5 / 2-5	-
ΔT6	4-7 / 4-7	4-7 / 4-7	4-7 / 4-7	4-7 / 4-7	4-7 / 4-7	4-7 / 4-7	4-7 / 4-7
ΔT8a	6-10 / 6-10	6-10 / 6-10	6-10 / 6-10	6-10 / 6-10	6-10 / 6-10	6-10 / 6-10	6-10 / 6-10
ΔT8b	-	-	-	-	-	-	-

Extracted from [1]

So for each of the value you determine if the actual temperature difference is lower (-) or higher (+) than references.

Criteria for the detection of faults and actions needed are presented in the following table.



	Cause	Visual detection	Monitoring parameter	Results	Monitoring parameter	Results
Maintain refrigerant loop	Refrigerant fluid leaks	Oil trace on carter / refrigerant loop	ΔT6	+	ΔT1	-
		Gas bubble				
		Regular refill				
Refill full charge of refrigerant	Incomplete charge of refrigerant	Gas bubble	ΔT6	+	ΔT1	-
Drain out refrigerant loop	Overload charge of refrigerant			+		
	Oil in evaporator			+		
	Oil in condenser			+		
	Mix of refrigerant fluid			not accurate		

Extracted from [1]

The potential savings for this ECO according to the UK field Trial up to 1.7%.

7 RECOMMENDATION FOR REALISATION OF ECO

After action 2&3, you have to fill correctly refrigerant loop.

8 ADDITIONAL SUPPORT

References:

[1] La pratique du froid, Jacquard P. S. Sandre, 2<sup>e</sup>Edition, 2004, PVC Edition Dunod.

9 REMARKS

O3.# COOLING EQUIPMENT

O3.16 CLEAN FINNED TUBE EVAPORATOR / CONDENSER  
AIR SIDE AND STRAIGHTEN DAMAGED FINS

A visual inspection can help to detect this ECO.

You can also to refer to ECO O3.12 to determine the fault(s) which occur(s) on existing on condenser or on evaporator.

1 EXISTING SUBSYSTEMS ON WHICH THE ECO MAY APPLY

- Subsystem 1: condenser air side.
- Subsystem 2: evaporator air side.

2 CONSIDERED ACTIONS

- Action 1: To clean air side exchanger.
- Action 2: To straighten damaged fins.

3 TECHNICAL DATA TO REQUEST TO OWNER/MANAGER OR TO FIND DIRECTLY  
(MANUFACTURER DATA)

Nominal consumption of fan (Pvent) and pump (Ppump)

4 TECHNICAL OBSERVATIONS TO BE MADE ON SITE

- The condenser air side is dirty.
- The evaporator air side is dirty.

5 MONITORING OF EXISTING SITUATIONS

- Condenser air side:  $\Delta T_2$ , Pvent/Ppomp .
- Evaporator air side:  $\Delta T_7$  Pvent/Ppomp .

Symbol	Equation	Description
T2	$T_{fsc} - T_{frec}$	Temperature difference of cooling fluid on condenser
T7	$T_{fcae} - T_{fcee}$	Temperature difference of heat carrier fluid on evaporator

Extracted from [1]



6 CRITERION FOR ECO APPLICABILITY

When coils are dirty/damaged you have to examine the following criterion.

Subsystem 1: condenser air side

- $\Delta T_2$  is higher than reference value provided in ECO O3.12 .
- Pvent/Ppomp is higher than nominal value.

Subsystem 2: evaporator air side

- $\Delta T_7$  is higher than reference value provided in ECO O3.12
- Pvent/Ppomp is higher than nominal value

Then you have to implement action1 and if there is little damage on exchanger action 2.

7 RECOMMENDATION FOR REALISATION OF ECO

8 ADDITIONAL SUPPORT

References:

[1] La pratique du froid, Jacquard P. S. Sandre, 2<sup>e</sup> Edition, 2004, PYC Edition Dunod.

9 REMARKS





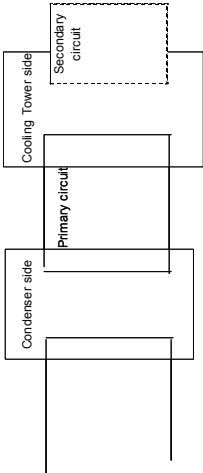
O3.# Cooling equipment

O3.19 CLEAN AND MAINTAIN COOLING TOWER CIRCUITS AND HEAT EXCHANGER SURFACES

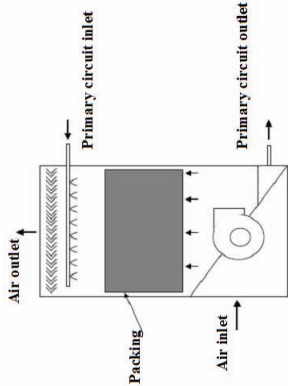
1 EXISTING SUBSYSTEMS ON WHICH THE ECO MAY APPLY

Cooling tower exchanger, cooling loop, evaporative condenser, fans, pumps

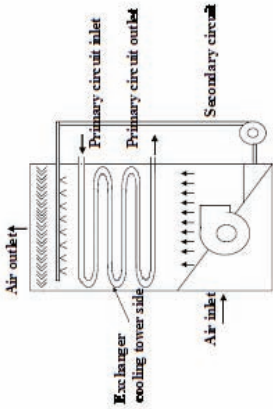
Schematic of general principle



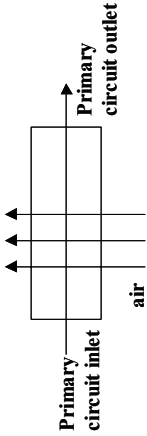
Schematic of an opened cooling tower



Schematic of a closed cooling tower



Schematic of a dry cooler



2 CONSIDERED ACTIONS

- Action 1: To maintain cooling tower circuits / pumps / fans
- Action 2: To clean cooling tower exchangers
- Action 3: To check glycol concentration

3 TECHNICAL DATA TO REQUEST TO OWNER/MANAGER OR TO FIND DIRECTLY (MANUFACTURER DATA)

- Nominal consumptions of fans
- Nominal consumptions of pumps

4 TECHNICAL OBSERVATIONS TO BE MADE ON SITE

- Exchanger surfaces are dirty

The picture below shows the fins of the heat exchanger, i.e. for a dry cooler. After only one summer season of operation the fins are significantly dirty.



Figure – Dirty fins

© Armines

- Faulty pump
- Level of water of secondary circuit

5 MONITORING OF EXISTING SITUATIONS

For each of the circuit you have to monitor the following values

- Temperature measurements:

Symbol	Equation	Description
$\Delta T_{3a}$	$T_{cond} - T_{sext}$	Difference between condensation temperature and dry bulb outdoor temperature
$\Delta T_{3b}$	$T_{cond} - T_{hext}$	Temperature difference of condensation and wet bulb temperature
$\Delta T_{5a}$	$T_{frec} - T_{sext}$	Temperature difference of cooling fluid at the inlet of condenser and dry bulb outdoor temperature
$\Delta T_{5b}$	$T_{frec} - T_{hext}$	Temperature difference of cooling fluid at the inlet of condenser and wet bulb outdoor temperature

Extracted from [1]

Before you have to check glycol concentration (action3) which could lead changing of  $\Delta T_3$  and  $\Delta T_5$ .

- Power and pressure measurements:

$P_{vent}$	Electrical absorbed power by each fan (W)
$\Delta p_{pomp}$	Pump differential pressure (bar)
$\Delta p_{cond}$	Differential pressure on condenser (Pa)
$P_{pomp}$	Electrical absorbed power by each pump (W)

Note: You have to measure  $P_{vent}$  when all fans operate.

- Concentration of glycol in water %
- Consumption of fresh water for desalination

6 CRITERION FOR ECO APPLICABILITY

You have to compare monitored values with the following reference values.

Reference values for water cooled condenser

	Water				Evaporative
	Recycle	Recycle	Recycle	Recycle	
	Opened tower	Closed tower	Dry cooler	Dry cooler	
$\Delta T_{3a}$	-	-	17-22	-	-
$\Delta T_{3b}$	-	-	-	10-12	-
$\Delta T_{5b}$	-	-	7-12	-	-
$\Delta T_{5a}$	3-7	7-15	-	-	-

Extracted from [1]

So for each of the value you determine if the monitored value is lower (-) or higher (+) than references to determined the required action. (Y) means a problem.

Monitored values for the consumption of pump and fan have to be compared with nominal manufacturer values.

Table: Detection of faults

Causes	Action 1 needed		Action 2 needed		
	Air flow rate too low	Water flow rate too low	Dirty heat exchangers primary circuit condenser side	Dirty heat exchangers primary circuit cooling tower side	Dirty heat exchanger cooling secondary circuit
$\Delta T3$		+		+	
$\Delta T5$		-		-	
Pvent				+ (Dry cooler)	
$\Delta ppomp$				+	+
$\Delta pcond$			+		
Ppomp				+	+
Faulty pump		Y			Y
Glogged water loop		Y	Y		Y
Faulty control	Y	Y			

Extracted from [1]

7 ADDITIONAL SUPPORT

References:

[1] La pratique du froid, Jacquard P. S. Sandre, 2<sup>e</sup> Edition, 2004, PYC Edition Dunod.

O4.# Fluid (air and water) handling and distribution

O4.14 CLEAN OR REPLACE FILTERS REGULARLY

- 1 EXISTING SUBSYSTEMS ON WHICH THE ECO MAY APPLY  
Centralized Air Conditioning systems with air handling units.
- 2 CONSIDERED ACTIONS

The specific fan power SFP depends on the pressure drop, the efficiency of the fan and the design of the motor, and it has to be noted also that leakages increase the SFP value. The pressure drop of components in the system should be as low as practicable to meet the performance requirements of the system, in order to keep the fan energy consumption as low as possible. In addition, the pressure drop can change due to, for example dust accumulation, and this can affect the system pressure balance.

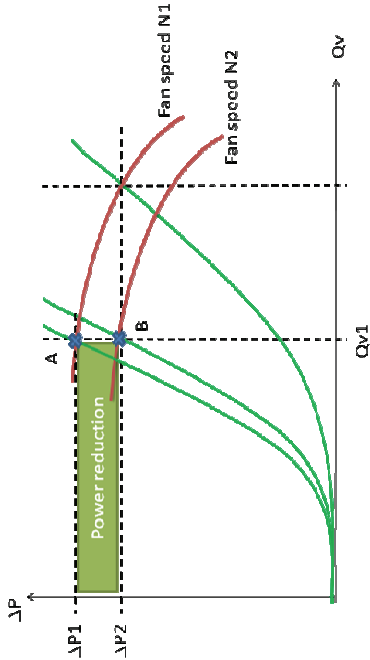
The following figure shows the link between the speed, the air flow rate and the pressure drop in the air handling units.

You can see in the figure that the speed required to ensure the desired flow rate  $Q_{v1}$  with a filter pressure drop  $\Delta P_1$  is higher than the speed required to ensure the same air flow rate with a lower filter pressure drop  $\Delta P_2$ . this will allow a hydraulic power reduction represented by the area bounded by points  $\Delta P_1$ ,  $\Delta P_2$ , A and B.

$$P_{\text{hydraulic power}} = Q_v \cdot p$$

$$Q_v \text{ flow rate}$$

$$p \text{ hydraulic pressure}$$



- 2.1 CONSIDERED ACTION 1

Optimise the Air Filter selection for a given particulate efficiency to give minimum pressure drop and energy usage.

- 2.2 CONSIDERED ACTION 2
- Regular filter changes are a straightforward measure which will reduce the pressure drop and energy usage across the filters.
- 3 TECHNICAL DATA TO REQUEST TO OWNER/MANAGER OR TO FIND DIRECTLY (MANUFACTURER DATA)

Actual filters pressure drop.

Fan running time.

- 4 TECHNICAL OBSERVATIONS TO BE ON SITE
- 5 MONITORING OF EXISTING SITUATIONS
- 6 CRITERION FOR ECO APPLICABILITY

Current indoor air quality standards (EN13779:2007) [1] and guidelines advise a minimum F7 class air filter. for the same class you can find different pressure drop. you should select the filter with the lowest pressure drop.

Examples for pressure drops for air filters in air handling systems

Component	Pressure losses in Pa		
	Low	Normal	High
Air filter F5-F7 per section*	100	150	250
Air filter F8-F9 per section*	150	250	400
* Final Pressure drop before replacement			

6.1 ENERGY SAVINGS

$$\text{Energy savings [W]} = t \cdot (\Delta P_{old} - \Delta P_{new}) \cdot Q_v / \eta$$

t Running time [hour]

$\Delta P_{old}$  Initial pressure drop [bar]

$\Delta P_{new}$  New pressure drop [bar]

$Q_v$  Air flow rate [m³/s]

$\eta$  Fan efficiency

if you don't have the running time, you can express the savings in % :

$$100 \cdot \frac{(\Delta P_{old} - \Delta P_{new})}{\Delta P_{old}}$$

6.2 ECONOMIC SAVINGS

Electrical energy costs currently would enable **typical annual savings** for one optimised full sized filter per year to be in the range of **(180€) to (360€)** for high usage plant. The short payback **time for optimising air filters, typically 3 to 6 months** depending on plant usage.

7 RECOMMENDATION FOR REALISATION OF ECO

8 ADDITIONAL SUPPORT

References

[1] EN 13779, July 2007, Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems

9 REMARKS

## Annexe 3 Exemples d'estimations de l'économie d'énergie pour une exploitation à débit variable

L'indicateur d'économie d'énergie que nous avons proposé au paragraphe 6.6.9 ne permet d'obtenir les économies d'énergie que pour les heures pendant lesquelles le besoin est non nul. Nous devons donc le modifier pour prendre en compte le fonctionnement classique d'une installation. C'est-à-dire que le temps total de fonctionnement  $t_{tot}$  s'écrit :

$$t_{tot} = t_{charge} + t_{inutile}$$

Les économies d'énergie pendant le temps de fonctionnement s'écrivent :

$$E_1 = E_{\%} P_{elec} t_{charge}$$

Les économies d'énergie pendant le temps de fonctionnement inutile s'écrivent :

$$E_2 = P_{elec} (t_{tot} - t_{charge}) \left( 1 - \frac{\dot{m}_{\% mini} \Delta P_r}{A_{charge}} \right)$$

Le coefficient  $A_{charge}$  représente physiquement la perte de rendement du variateur de vitesse et du moteur pour un débit d'eau minimal relatif au régime nominal considéré ( $\dot{m}_{\% mini}$ ), dans notre cas  $\dot{m}_{\% mini}$  est égal à 20%. Notons également que ce coefficient dépend également de la stratégie utilisée. Dans cette dernière équation nous avons introduit un différentiel de pression relatif  $\Delta P_r$ , ce différentiel s'exprime à l'aide de l'équation suivante :

$$\Delta P_r = \frac{\Delta P_{\% mini}}{\Delta P_{nom}}$$

Avec  $\Delta P_{nom}$  le différentiel de pression nominale de l'installation et  $\Delta P_{\% mini}$  le différentiel de pression pour un débit d'eau minimal relatif au régime nominal considéré ( $\dot{m}_{\% mini}$ ), dans notre cas  $\dot{m}_{\% mini}$  est égale à 20%.

Nous donnons dans un tableau suivant les valeurs de  $A_{charge}$  et  $\Delta P_r$  pour  $\dot{m}_{\% mini}$  égal à 20%.

		Moteur de puissance à l'arbre < 750 W	Moteur de puissance à l'arbre > 750 W
$A_{charge}$	Stratégie $\Delta P$ constant	0,40	0,45
	Stratégie $\Delta P$ proportionnel	0,32	0,36
	Stratégie basée sur la demande	0,04	0,04
$\Delta P_r$	Stratégie $\Delta P$ constant	100%	
	Stratégie $\Delta P$ proportionnel	60%	
	Stratégie basée sur la demande	4%	

Valeurs utilisées pour  $A_{charge}$  et  $\Delta P_r$

L'économie totale d'énergie s'écrit :

$$E = E_1 + E_2^{72}$$

<sup>72</sup> Notons que lorsque  $t_{tot} = t_{charge}$ ,  $E_2 = 0$

### Annexe 3 Exemples d'estimations de l'économie d'énergie pour une exploitation à débit variable

Pour évaluer les économies d'énergie de notre typologie de bâtiment, nous considérons les trois modes de fonctionnement :

- Un fonctionnement annuel ( $t_{tot} = 8760$  heures / an)
- Une programmation hebdomadaire permettant de l'arrêter le week-end ( $t_{tot} = 6456$  heures / an)
- Une programmation hebdomadaire et journalière ( $t_{tot} = 3324$  heures / an)

A défaut d'avoir un relevé de la consommation et de la puissance de la pompe, nous proposons d'utiliser, les temps de fonctionnement à charge thermique non nulle obtenue pendant nos simulations (voir tableau suivant).

		Temps de fonctionnement pour une charge thermique non nulle (h)
Type 3	Paris	1200
	Lisbonne	1996
	Stockholm	1291
	Turin	791
Type 2	Paris	1090
Type 1c	Paris	1276
	Lisbonne	2505
	Stockholm	1468
	Turin	1275
Type 1b	Paris	1234
Type 1a	Paris	1417

*Temps de fonctionnement pour une charge thermique non nulle*

En utilisant ces temps de fonctionnement nous calculons successivement : l'économie d'énergie ( $E_1$ ), puis en fonction des trois scénarios de temps de fonctionnement présentés précédemment l'économie d'énergie pour les deux périodes de fonctionnement ( $E$ ). Le tableau suivant présente les résultats que nous avons obtenus pour les trois stratégies de régulation et des ventilo-convecteurs à 3 vitesses avec régulation automatique.

		Economie d'énergie kWh/m <sup>2</sup> (SHON)								
		8760 heures / an			6456 heures / an			3324 heures / an		
		Stratégie $\Delta P$ constant	Stratégie $\Delta P$ proportionnel	Stratégie basée sur la demande	Stratégie $\Delta P$ constant	Stratégie $\Delta P$ proportionnel	Stratégie basée sur la demande	Stratégie $\Delta P$ constant	Stratégie $\Delta P$ proportionnel	Stratégie basée sur la demande
Type 3	Paris	1,29	1,62	2,08	0,94	1,18	1,53	0,47	0,60	0,78
	Lisbonne	1,27	1,60	2,07	0,93	1,17	1,52	0,46	0,58	0,77
	Stockholm	1,29	1,61	2,08	0,94	1,18	1,53	0,47	0,59	0,78
	Turin	1,30	1,62	2,09	0,95	1,19	1,54	0,48	0,61	0,79
Type 2	Paris	1,53	1,83	2,23	1,12	1,34	1,64	0,57	0,67	0,83
Type 1c	Paris	3,41	4,06	4,95	2,50	2,96	3,64	1,26	1,47	1,85
	Lisbonne	3,35	3,96	4,91	2,44	2,86	3,59	1,20	1,37	1,81
	Stockholm	3,40	4,04	4,95	2,49	2,95	3,63	1,25	1,46	1,84
	Turin	3,41	4,06	4,95	2,50	2,96	3,64	1,26	1,47	1,85
Type 1b	Paris	2,36	2,81	3,43	1,73	2,05	2,52	0,87	1,02	1,28
Type 1a	Paris	2,83	3,37	4,12	2,07	2,46	3,02	1,04	1,22	1,54

*Economie d'énergie pour la variation de vitesse*

Le temps de fonctionnement à charge non nulle peut être un élément difficile à mesurer sur site existant à vitesse fixe. Sachant que nous avons l'indicateur E% à notre disposition (voir Tableau 6-26 et Tableau 6-27), nous proposons d'utiliser cette indicateur pour évaluer l'économie d'énergie totale réalisée par l'installation d'un variateur de vitesse sur une pompe existante. Nous proposons de calculer le biais introduit par cette méthode de calcul :

$$biais = \frac{t_{tot} E_{\%} P_{elec} - E_{tot}}{E_{tot}}$$

Nous pouvons déjà dire que le biais est maximal pour une durée de fonctionnement de 8760 heures / an (voir la note de bas de la page 312) et que celui-ci est négatif.

Parmi ces comparaisons, nous extrayons un exemple dans le tableau suivant :

		Biais relatif à l'utilisation de E%		
		Stratégie $\Delta P$ constant	Stratégie $\Delta P$ proportionnel	Stratégie basée sur la demande
Type 3	Paris	-12%	-11%	-5%
	Lisbonne	-11%	-10%	-5%
	Stockholm	-12%	-10%	-5%
	Turin	-13%	-11%	-6%
Type 2	Paris	-10%	-13%	-6%
Type 1c	Paris	-10%	-12%	-5%
	Lisbonne	-9%	-10%	-5%
	Stockholm	-10%	-12%	-5%
	Turin	-10%	-12%	-5%
Type 1b	Paris	-10%	-12%	-5%
Type 1a	Paris	-10%	-12%	-5%

*Biais de la méthode simplifiée*

Le biais introduit par notre approximation est au maximum de 13%. Nous proposons par conséquent d'utiliser l'équation suivante pour estimer rapidement les économies d'énergie :

$$E_{tot} \approx t_{tot} E_{\%} P_{elec}$$

Nous rappelons que les valeurs de  $E_{\%}$  sont synthétisées au Tableau 6-26 et au Tableau 6-27.

Finalement, la méthode d'évaluation développée requiert les données suivantes :

- La puissance du moteur à l'arbre
- Le temps annuel de fonctionnement de la pompe
- Le type de ventilo-convecteur (1 vitesse d'air, trois vitesses d'air)



## Annexe 4 Exemple d'application des procédures développées

Dans cette annexe nous réalisons une étude de cas pour illustrer les procédures développées dans le chapitre 6.

Le cas d'étude est un bâtiment tertiaire de bureaux d'une taille de 1440 m<sup>2</sup>, situé en région parisienne équipé par un système de **distribution d'eau glacée à débit constant** et de **ventilo-convecteurs** possédant **trois vitesses d'air et un mode automatique**. Une étude préalable a permis de montrer que le groupe de production d'eau glacée est surdimensionné et que la pompe est sous-dimensionnée. Il est envisageable de remplacer la régulation terminale des ventilo-convecteurs effectuée au moyen de vannes 3 voies par des vannes 2 voies et d'introduire un dispositif de variation de fréquence au niveau de la pompe d'eau glacée. La description de ce cas d'étude a permis d'effectuer **la recherche des éléments visuels** de la procédure.

Nous nous attachons à réaliser cette étude pour la **stratégie de contrôle à pression constante**.

L'absence de compteur individualisé au niveau de la pompe ne permet pas de connaître sa consommation. En supposant six mois de fonctionnement, et en prenant la puissance nominale du moteur, nous **estimons la consommation pré-modernisation** de la pompe à 3285 kWh/an.

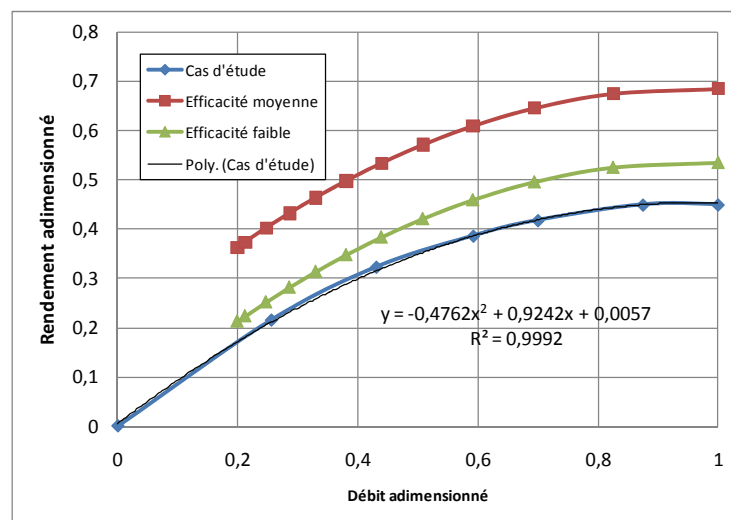
En utilisant les valeurs par défaut du Tableau 6-27, **l'économie d'énergie est estimée dans l'intervalle [34% ; 43%]**.

L'économie d'énergie estimée est comprise dans [1.1MWh/an ; 1.6MWh/an] soit [111€ ; 160€] pour un prix d'électricité de 0.1 €/kWh.

Une mesure ponctuelle de la puissance permet de **réévaluer la consommation pré-modernisation** aux chiffres suivants [119€/an ; 171€/an].

Nous cherchons maintenant à vérifier que les hypothèses utilisées pour l'évaluation statique sont cohérentes avec celles qu'il est possible d'évaluer dans le cas d'étude.

Les caractéristiques hydrauliques de la pompe ont été obtenues en contactant le fabricant. Le point de meilleur rendement est obtenu pour un débit de 8 m<sup>3</sup>/h avec une efficacité de 45%. Les données du constructeur sont extrapolées sur la figure suivante.



*Rendement hydraulique de la pompe existante*

La pompe a une efficacité plus faible que celle définie par la classe « efficacité moyenne » [Sfeir05]. Comme l'efficacité utilisée afin d'évaluer le benchmark est celle d'une pompe à efficacité moyenne, **les économies d'énergie calculés avec cette hypothèse sont surévaluées.**

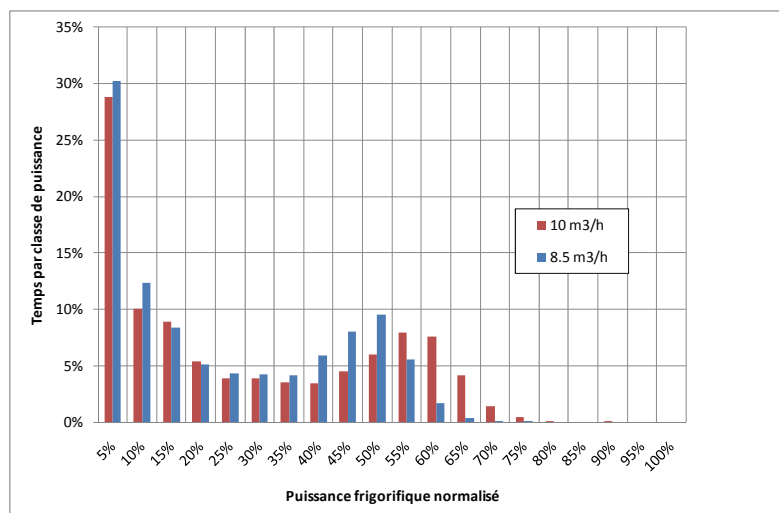
La deuxième procédure proposée au paragraphe 6.8.3 (option 2) ne permet pas d'évaluer directement l'économie d'énergie. Il est en effet nécessaire **d'évaluer la charge thermique de l'installation.**

Une instrumentation au moyen de deux thermocouples (mesure toute les 4minutes) placés dans des doigts de gant du réseau à permis de déterminer la puissance échangée pour une période de deux mois et en faisant une hypothèse sur le débit de la pompe. Nous avons calculée la puissance échangée par deux mesures indirects de débit : à l'aide de la mesure du différentiel de pression ou de la mesure d'intensité et ce utilisant pour chacun des cas la courbe caractéristique de la pompe. Les valeurs obtenues sont 10.5 m<sup>3</sup>/h (en utilisant le différentiel de pression) et 8.5 m<sup>3</sup>/h (en utilisant la mesure d'intensité).

Afin de normaliser la puissance échangée, il est nécessaire de déterminer la puissance frigorifique installée au niveau des ventilo-convecteurs. En absence de la référence du modèle exacte des ventilo-convecteurs, nous avons choisi deux valeurs correspondant :

- A une puissance frigorifique installée de 100 kW. Cette valeur a été obtenue en supposant que les ventilo-convecteurs sont les modèles ayant la plus faible capacité de rafraîchissement.
- A une puissance frigorifique installée obtenue avec un coefficient de foisonnement de 0.8. Ce coefficient est celui généralement utilisé pour le dimensionnement du groupe de production (chapitre 1, paragraphe 1.9.4.1)

Sur la figure ci-dessous nous avons établi le temps de fonctionnement pour chaque classe de puissance normalisée pour une puissance frigorifique de 100 kW et ce pour chacune des estimations de débit.

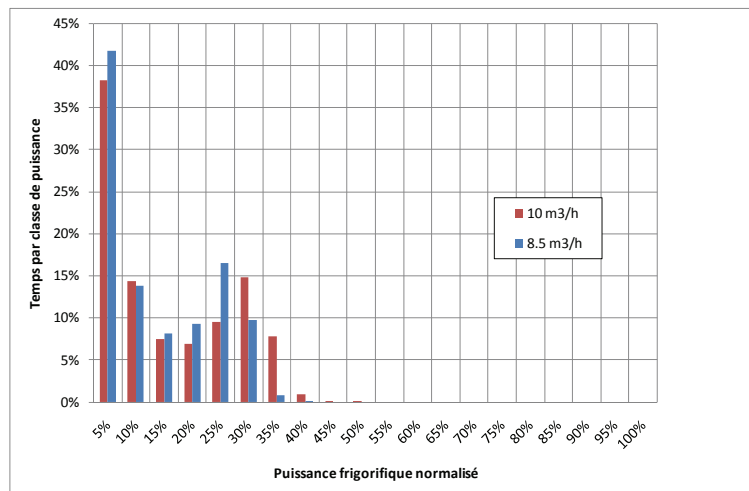


*Répartition temporelle de la puissance frigorifique consommée*

En utilisant ce profil de charge, **les économies d'énergie sont dans l'intervalle [28% ; 32%] pour un débit de 8.5 m<sup>3</sup>/h et [26% ; 33%] pour un débit de 10 m<sup>3</sup>/h.**

L'économie minium après une investigation importante est de **91€/an** réduisant l'estimation initiale de 23%.

Sur la figure ci-dessous, nous avons établi le temps de fonctionnement pour chaque classe de puissance normalisé pour un coefficient de foisonnement de 0.8 et ce pour chacune des estimations de débit.



*Répartition temporelle de la puissance frigorifique consommée*

En utilisant ce profil de charge, **les économies d'énergie sont dans l'intervalle [31% ; 36%] quel que soit le débit estimé, soit un minimum de 108€/an**. Il pourrait être intéressant de connaître avec plus de précision le modèle des ventilo-convecteurs si cette démarche coûte moins de 19€.

Ce cas d'étude illustre que la connaissance du dimensionnement influence l'estimation des économies d'énergie. Toutefois, l'évaluation basée sur des ratios a été effectuée rapidement et avec peu d'information.

## Annexe 5 Procédure de mesure de la puissance électrique pour un réseau déséquilibré

Dans l'annexe 4, nous avons effectué une mesure de la puissance de la pompe. Nous examinons dans cette partie l'influence, en général, du protocole de mesure d'une puissance électrique d'une pompe sur l'estimation de la consommation pré-modernisation.

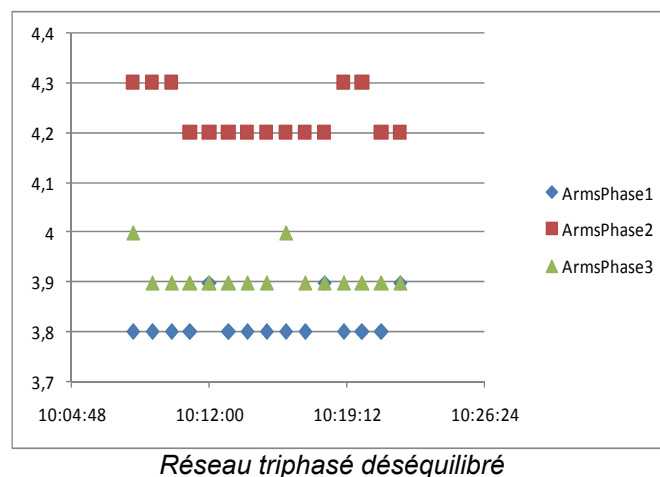
Comme la pompe est à débit fixe, d'après [ASHRAEG02], un seul point de mesure suffit pour caractériser le point de fonctionnement de la pompe.

Une mesure de la puissance consommée par la pompe à l'aide d'un wattmètre triphasé représente l'outil technique le plus précis. Une mesure moins précise serait d'effectuer la mesure de la tension efficace composée ( $U$ ), de l'intensité efficace ( $I$ ) et du déphasage d'une des phases ( $\varphi$ ), la puissance totale consommée ( $P$ ) est alors donnée à l'aide de l'équation suivante :

$$P_{active} = K U I \cos \varphi = K U I F P$$

Avec  $K = \sqrt{3}$  pour un réseau triphasé,  $K = 2$  pour un réseau diphasé et  $K = 1$  pour un réseau monophasé.

Cette formulation est exacte si les trois phases sont équilibrées c'est-à-dire si les courants traversant les deux autres phases sont identiques, ce qui n'est pas le cas dans la plupart des installations. Un exemple de déséquilibre du réseau triphasé est donné dans la figure suivante.



Un calcul de la précision a été effectué sur ce même réseau. Nous avons calculé la puissance à l'aide de l'équation précédente pour chacune des phases, ces puissances sont notés  $W1$ ,  $W2$  et  $W3$ , et la moyenne des trois mesures. L'erreur est calculée en prenant comme référence le calcul effectué par l'appareil de mesure pour un réseau triphasé non équilibré. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant.

Erreur /W1	Erreur /W2	Erreur /W3	Erreur/moyenne
3,0%	-7,5%	5,0%	0,1%
2,0%	-7,0%	5,6%	0,2%
2,1%	-6,9%	5,4%	0,2%
1,9%	-6,3%	4,9%	0,1%
1,2%	-5,6%	4,9%	0,1%
2,5%	-6,6%	4,4%	0,1%
0,9%	-6,3%	6,1%	0,2%
2,2%	-6,3%	4,4%	0,1%
2,0%	-6,2%	4,6%	0,1%
1,3%	-6,5%	5,8%	0,2%
1,3%	-5,5%	4,7%	0,1%
0,7%	-6,5%	6,4%	0,2%
2,2%	-7,2%	5,6%	0,2%
1,4%	-6,0%	5,0%	0,1%
-0,2%	-5,3%	6,2%	0,2%

*Erreur introduite par la mesure d'une unique phase*

L'erreur commise est relativement importante sur la deuxième ligne d'alimentation. L'économie d'énergie estimée à l'aide de cette ligne sera donc supérieure à celle qui pourra être réellement constatée. L'erreur correspondante pour la période de mesure représente 6,4%, celle-ci ne prend pas en compte l'erreur de l'appareil de mesure qui dans le cas de notre matériel est de l'ordre de +/- 1%. La mesure de chacune des phases permet de limiter l'erreur commise à 0.2% en moyennant les trois mesures.

## Annexe 6 Détermination du ESEER d'un GPEG à défaut d'information

Pour déterminer le ESEER à défaut d'information nous proposons que l'inspecteur relève le EER de la machine puis utilise un indicateur égal au rapport du ESEER sur le EER<sup>73</sup>.

Nous nous sommes appuyés sur certains chiffres de [Riviere04] et les avons complétés par des modèles plus récents. Nous avons classifié notre indicateur en distinguant le type de compresseur, le nombre de compresseur, le nombre de circuit et le nombre d'étage. Ces informations sont présentées dans le tableau suivant. Sur cette figure nous avons fait apparaître certaines catégories pour lesquelles notre indicateur varie peu.

	Nb compresseur	Nb circuit	Nb étage	ESEER/EER	Biais / Moyenne / Catégorie	Moyenne / Catégorie	Moyenne / Type de compresseur & nb compresseur
Bivis	2	2	6	1,23	2%	1,21	1,21
Bivis	3	2	7	1,21	0%		
Bivis	6	2	7	1,22	1%		
<b>Bivis</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>NA</b>	<b>1,18</b>	-2%		
Piston herm.	2	2	2	1,17	0%	1,17	1,17
Piston Semi-herm.	6	2	6	1,36	-2%	1,39	1,39
Piston Semi-herm.	3	2	7	1,45	4%		
Piston Semi-herm.	8	2	7	1,35	-3%		
Spiro-orbital	1	1	1	1,06	-6%	1,12	1,12
Spiro-orbital	1	1	1	1,14	1%		
<b>Spiro-orbital</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1,17</b>	4%		
<b>Spiro-orbital</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>1,42</b>	0%	1,42	1,40
<b>Spiro-orbital</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>1,25</b>	0%	1,25	
Spiro-orbital	2	1	3	1,31	-6%	1,39	
<b>Spiro-orbital</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>1,37</b>	-1%		
Spiro-orbital	2	1	3	1,42	2%		
Spiro-orbital	2	1	3	1,47	5%		
Spiro-orbital	3	1	3	1,41	0%	1,42	
Spiro-orbital	3	1	3	1,42	0%	1,43	
Spiro-orbital	4	2	4	1,29	-11%		
<b>Spiro-orbital</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>1,38</b>	-3%		
Spiro-orbital	4	2	4	1,44	1%		
Spiro-orbital	4	2	4	1,44	1%		
Spiro-orbital	4	2	4	1,58	10%		
Spiro-orbital	6	2	6	1,29	-6%	1,37	
<b>Spiro-orbital</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>6</b>	<b>1,44</b>	5%		
<b>Spiro-orbital</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>8</b>	<b>1,45</b>	0%	1,45	

*Etude de GPEG représentatifs du marché*

Par exemple, quelle que soit la technologie bivis utilisée, notre indicateur est égal à environ 1.2. Mais nous nous sommes également attachés à faire apparaître des distinctions pour la technologie spiro-orbitale. En effet, le nombre de compresseur a une forte influence pour cette technologie. C'est pourquoi nous proposons de retenir les catégories de valeurs du tableau suivant. Un auditeur peut rapidement effectuer une estimation du ESEER en utilisant ces catégories.

<sup>73</sup> Notons que d'autres méthodes existent [Duplessis08], mais certaines spécificités techniques des groupes ne sont pas considérées.

	ESSEER/EER
Bivis	1,21
Piston semi-hermétique	1,39
Piston hermétique	1,17
Spiro-orbital à 1 compresseur	1,12
Spiro-orbital à plusieurs compresseurs	1,40

*Benchmark proposé pour calculer le ESEER*

## Annexe 7 Statistiques des Certificats d'Economies d'Energie (CEE)

L'étude statistique des opérations standardisée des Certificats d'Economies d'Energie, présentée dans le tableau suivant, est extraite de [LCEE10].

Référence	Intitulé de l'opération standardisée	% kWh
BAR-TH-06	Chaudière individuelle de type Condensation	20,5 %
BAR-TH-08	Chaudière individuelle de type Basse température	10,5 %
BAR-TH-07	Chaudière collective de type Condensation	6,8 %
BAR-EN-01	Isolation de combles ou de toitures	5,7 %
BAR-TH-29	Pompe à chaleur de type air / air	5,2 %
BAR-TH-04	Pompe à chaleur de type air/ eau	5 %
BAR-EN-04	Fenêtre ou porte-fenêtre complète avec vitrage isolant	4,3 %
IND-UT-02	Système de variation électronique de vitesse sur un moteur	3,6 %
BAR-TH-12	Appareil indépendant de chauffage au bois	2,8 %
BAR-TH-09	Chaudière collective de type Basse température	2,8 %
BAR-TH-07-SE	Chaudière collective de type Condensation avec contrat assurant le maintien du rendement énergétique de la chaudière	2,5 %
RES-CH-01	Production de chaleur renouvelable en réseau (métropole)	2,5 %
BAR-EN-02	Isolation des murs	2,3 %
BAR-EQ-01	Lampe fluo-compacte de classe A	2,2 %
BAR-TH-24	Chauffe-eau solaire individuel (DOM)	2 %
BAT-TH-02	Chaudière de type Condensation	1,2 %
BAR-TH-18	Programmeur d'intermittence sur une chaudière existante pour un chauffage individuel à combustible	1,2 %
BAR-TH-13	Chaudière biomasse individuelle	1,1 %
BAR-TH-37	Raccordement bât. résidentiel à réseau de chaleur alimenté par ENR	1,1 %
BAR-TH-03	Pompe à chaleur de type eau/eau	0,9 %
RES-EC-04	Luminaire d'éclairage extérieur	0,8 %
BAR-TH-23	Optimiseur de relance en chauffage collectif	0,8 %
IND-UT-08	Ballon de stockage d'eau chaude de type "Open Buffer"	0,7 %
BAR-TH-11	Régulation par sonde de température extérieure	0,7 %
BAT-TH-27	Raccordement bât. tertiaire à réseau de chaleur alimenté par ENR	0,6 %
BAT-TH-01	Chaudière de type Basse température	0,6 %
BAR-TH-22	Récupérateur de chaleur à condensation	0,6 %
RES-CH-04	Réhabilitation d'un poste de livraison de chaleur (Bât. résidentiel)	0,5 %
BAR-SE-01	Formation acteurs professionnels du bâtiment aux éco. énergies	0,5 %
BAT-EN-01	Isolation de combles ou de toitures	0,5 %

*Statistiques des opérations standardisées au 20 mai 2010 [LCEE10]*









## **Méthodologies d'identification d'économies d'énergie : Application aux systèmes de climatisation à eau glacée**

**RESUME :** La thèse a permis de formaliser des méthodologies pour identifier et quantifier des économies d'énergie dans le domaine de la climatisation à eau glacée.

Une démarche est proposée pour permettre d'établir un référentiel d'options d'amélioration. Cette démarche repose sur l'analyse des facteurs d'inefficacité du système pendant une partie de son cycle de vie (conception, installation, exploitation et maintenance).

Par ailleurs, l'analyse des méthodes d'identification montre que celles-ci doivent être utilisées d'une façon complémentaire pour obtenir des résultats de qualité. L'analyse des méthodes d'évaluation montre qu'elles peuvent être utilisées pour le développement structurel d'un service énergétique. Une analyse plus approfondie, en fonction des coûts humains et techniques et de la disponibilité des informations, permet de proposer une sélection de modèles. Ces modèles permettent d'élaborer des outils d'évaluation pour chacune des étapes du travail d'un inspecteur ou d'un auditeur.

Les méthodologies et les modèles sont utilisés pour permettre l'identification des économies d'énergie relatives à l'amélioration de l'exploitation du réseau d'eau glacée. Certaines de ces options peuvent modifier les conditions d'ambiance intérieure, le confort devant alors être vérifié. Des procédures d'identification d'économies d'énergie sont ensuite proposées.

Enfin, une analyse du mécanisme d'inspection réglementaire est effectuée. Les méthodologies sont utilisées pour augmenter la portée des conseils. L'évaluation quantitative proposée, rapide et peu coûteuse, prend en compte les spécificités du bâtiment et du système inspecté.

**Mots clés :** *Climatisation, économies d'énergie, évaluation, efficacité énergétique, procédure, inspection*

## **Methodologies to Identify Energy Savings : Practical Application to Chilled Water Systems**

**ABSTRACT :** The doctoral thesis formalized methods to identify and quantify energy savings in chilled water systems.

An approach is proposed to develop a set of potential solutions. This approach, illustrated by examples, is based on the analysis of the factors of inefficiency during the life cycle of the system (design, installation, operation and maintenance).

Moreover, the analysis of existing identification methods shows they have to be used altogether to produce better conclusions. The analysis of assessment methods shows they can be used for the structural development of energy services. Besides, a detailed analysis of human and technical cost and information availability allows selecting models. These models allow the development of assessment tools for each step of inspector / auditor task.

Methodologies and models are applied to identify the potential energy savings of efficiently operated chilled water network. Several of these options can modify indoor thermal conditions. In that case, comfort conditions are maintained. Then, procedures are proposed to identify energy savings.

Finally, we analyse the impact of statutory inspection. Methods are applied to improve the advisory impact. The final procedure is a quantitative and cost-effective approach that can easily take into account building and system site specific conditions.

**Keywords :** *Air-Conditioning, Energy Savings, Assessment, Energy Efficiency, Procedure, Inspection*

